

# 「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」

## 事業原簿

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------



# —目次—

## 内容

### 概 要

### プロジェクト用語集

<b>1. 意義アウトカム（社会実装）達成までの道筋</b> .....	<b>1-1</b>
<b>1.1. 事業の位置付け・意義</b> .....	<b>1-1</b>
1.1.1. 背景 .....	1-1
1.1.2. 本事業の目的 .....	1-3
1.1.3. 本事業の将来像 .....	1-4
1.1.4. 政策・施策における位置づけ .....	1-4
1.1.5. 技術戦略上の位置付け .....	1-4
1.1.6. 国内外の動向との比較 .....	1-6
<b>1.2. アウトカム達成までの道筋</b> .....	<b>1-8</b>
<b>1.3. 知的財産・標準化戦略</b> .....	<b>1-9</b>
<b>2. 目標及び達成状況</b> .....	<b>2-1</b>
<b>2.1. アウトカム目標及び達成見込み</b> .....	<b>2-1</b>
2.1.1. アウトカム目標の設定及び根拠 .....	2-1
2.1.2. 波及効果 .....	2-2
2.1.3. 本事業における実用化の考え方及び見込み .....	2-2
2.1.4. 費用対効果 .....	2-2
<b>2.2. アウトプット目標及び達成状況</b> .....	<b>2-3</b>
2.2.1. アウトプット目標の設定及び根拠 .....	2-3
2.2.2. アウトプット目標の達成状況 .....	2-4
2.2.3. 研究開発成果の意義 .....	2-5
2.2.4. 副次的成果及び波及効果 .....	2-6
2.2.5. 特許出願状況及び論文発表 .....	2-6
<b>3. マネジメント</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.1. 実施体制</b> .....	<b>3-1</b>
<b>3.2. 受益者負担の考え方</b> .....	<b>3-2</b>
<b>3.3. 研究開発計画</b> .....	<b>3-2</b>

<b>4. 目標及び達成状況の詳細</b> .....	<b>4-1</b>
<b>4.1 研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発</b>	
<b>「溶融塩使用固体電解によるアルミ合金スクラップからの高純度アルミ精製技術の開発」</b>	
.....	<b>4-1</b>
実施者名、実施体制 .....	4-1
期間、予算 .....	4-1
実用化への道筋 .....	4-1
アウトプット目標の達成状況 .....	4-2
成果の意義 .....	4-4
特許出願件数、論文発表数 .....	4-8
研究開発成果の詳細 .....	4-9
<b>4.2 研究開発項目①、②</b>	
<b>「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」概要</b>	
.....	<b>4-18</b>
<b>4.3 研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発</b>	
<b>「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」</b>	
.....	<b>4-20</b>
実施者名、実施体制 .....	4-20
期間、予算 .....	4-20
実用化への道筋 .....	4-20
アウトプット目標の達成状況 .....	4-21
成果の意義 .....	4-22
研究開発成果の詳細①-1 .....	4-22
研究開発成果の詳細①-2 .....	4-29
<b>4.4 研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発</b>	
<b>「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」</b>	
.....	<b>4-37</b>
実施者名、実施体制 .....	4-37
期間、予算 .....	4-37
実用化への道筋 .....	4-38
アウトプット目標の達成状況 .....	4-39
成果の意義 .....	4-42

研究開発成果の詳細②-1 .....	4-44
研究開発成果の詳細②-2 .....	4-55
研究開発成果の詳細②-3 .....	4-63
研究開発成果の詳細②-4 .....	4-67
研究開発成果の詳細②-5 .....	4-71
(添付資料)	
・プロジェクト基本計画	
・TSC Foresight Vol.35 資源循環（プラスチック、アルミニウム）分野の技術戦略策定に向けて	
・事前評価結果（研究開発事業に係る技術評価書）	
・NEDO POST の結果	
・特許論文等リスト	



## 概要

		最終更新日	2023年6月13日	
プロジェクト名	アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業	プロジェクト番号	P21003	
担当推進部/ PMまたは担当者 及び METI 担当課	環境部 PM 伊東 賢宏 (2021年8月～2021年11月) PM 今西 大介 (2021年12月～現在)			
0. 事業の概要	アルミニウム素材の高度資源循環を実現するため、溶解工程高度化による不純物元素軽減技術、鑄造・加工・成形技術高度化による微量不純物無害化技術などを組み合わせることにより、アルミニウムスクラップから高性能な再生展伸材を開発する。			
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋				
1.1 本事業の位置 付け・意義	アルミニウムは、資源循環向上の取組が特に期待される素材であり、輸送機器の軽量化等、CO2 排出量削減を目的とする用途において需要の大きな伸びが予測されているが、電解製錬により新地金を製造するため、製造時の CO2 排出量原単位が 11.1 kg-CO2eq/kg と大きいという課題がある。一方、再生地金は、再生のためのエネルギー消費が小さく、その排出原単位が新地金の 1/20 以下と少ないことから、SDGs、CSR、ESG 投資などの影響により需要が増大しつつある低環境負荷のアルミニウム素材として活用が期待されている。ただし、アルミニウムスクラップのリサイクル過程で混入する不純物により、再生地金は一部の用途に使用が限定される状況にある。従って、低環境負荷型の再生地金の使用用途を拡大するための高度なリサイクル技術の開発は、アルミニウム素材を利用する国内製造企業における製品の環境性能向上を可能とし、資源制約の克服や地球環境問題の解決に貢献すると同時に、わが国企業の競争力向上につなげることができる。			
1.2 アウトカム達成 までの道筋	本研究開発事業では、アルミニウムスクラップを再生展伸材として資源循環するために 2 つの研究開発項目を実施する。不純物元素軽減技術の開発、微量不純物元素を無害化する高度加工技術の 2 つの開発の研究開発により、自動車への利用も可能なアルミニウム再生展伸材のリサイクルシステム設備を完成する。その成果を基に実操業による動作実証を行い、製造設備としてのリサイクルシステム装置を完成し上梓する。アルミニウムスクラップリサイクルを可能とする設備を日本全国のアルミニウム製造事業所に展開し、2040 年に年間約 130 万トン/年の再生展伸材を市場へ供給する。			
1.3 知的財産・標準化戦略	知的財産に関する戦略は、アルミニウム再生展伸材についての含有不純物元素や性状を公開することでオープン戦略とする。詳細な製造技術等について国内アルミニウム関連事業者への特許の許諾を行う事で国内でのアルミニウム製造事業の活性化を図ることでクローズ戦略とする。また、標準化に関しては、再生アルミニウム展伸材料を新規合金種登録するための材料選定を進める。			
2. 目標及び達成状況				
2.1 アウトカム目標 及び達成見込み	【アウトカム目標】2040 年度までにアルミニウム圧延業界を中心に再生展伸材の製造技術を確立し、普及率 30%に当たる再生展伸材生産量 130 万トン/年、CO2 削減量 968 万 t/年を達成する。さらに、2050 年度までに中長期アウトカム再生展伸材生産量 257 万トン/年、CO2 削減量 1,914 万 t/年を達成する。これにより、アルミニウム素材の高度資源循環システムの社会実装へと展開する。その結果として、国内企業における製品の環境性能向上による国際競争力強化、及び幅広い産業における温室効果ガス排出量削減を実現する。 【達成状況】本事業が終了する 2025 年度末に 200kg/day のベンチスケール機を事業成果として達成する予定であり、その後実証を進め 2026 年からは 2t/hour の装置開発を進め、2030 年からはさらにスケールアップを行い 40t/hour の実用装置開発を進める。2040 年にはこの実用装置の複数台稼働を想定し 130 万 t/year を見込む。			
2.2 アウトプット目標 及び達成状況	研究開発項目	中間目標		計画との差異
	①不純物元素 軽減技術の開発	Si : 5%以上を含むアルミニウムスクラップから Si : 3%以下の再生アルミニウムを 70%以上回収可能とする技術を開発する。		○ 2024年3月 中間目標 達成見込み

	②微量不純物元素を無害化する高度加工技術の開発	Si：3%を含む再生材を使用した Al-Mg-Si 系（6000 系）合金で、以下の特性を有する材料を得るための技術を開発する。 ・従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系（6000 系）成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.8 倍 ・従来の新地金ベース 6000 系構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.2 倍	○ 2024 年 3 月 中間目標 達成見込み						
3. マネジメント									
3.1 実施体制	経産省担当 原課	製造産業局 金属技術室 産業技術環境局 資源循環経済課							
	プロジェクト マネージャー	NEDO 環境部 3R グループ 主任研究員 今西 大介							
	委託先	<ul style="list-style-type: none"> <li>・研究開発項目①不純物元素低減技術の開発 【助成先】(株)豊栄商会、(株)UACJ、(株)大紀アルミニウム工業所、トヨタ自動車(株)、本田技研工業(株)、(株)デンソー、東洋製罐ホールディングス(株)、東洋製罐(株)、日本軽金属(株) 【共同研究先】東北大学、(国研)産業技術総合研究所</li> <li>・研究開発項目②微量不純物元素を無害化する高度加工技術の開発 【助成先】(株)UACJ、本田技研工業(株)、(株)デンソー、東洋製罐ホールディングス(株)、東洋製罐(株)、(株)神戸製鋼所、(株)エイゾス、(一社)日本アルミニウム協会 【共同研究先】東京工業大学、千葉工業大学、九州工業大学、東京農工大学、静岡大学、東京電機大学、大阪工業大学、日本工業大学、東京大学、(国研)国立環境研究所、総合地球環境学研究所</li> </ul>							
3.2 受益者負担の 考え方  事業計画内容 事業費推移 (単位：百万円)	研究開発項目	2021	2022	2023	2024	2025	2026		
	①不純物元素低減技術の開発	➡							
	②微量不純物元素を無害化する高度加工技術の開発	➡							
				中間評価				事後評価	
	会計・勘定	2021	2022	2023	2024	2025	総額		
	一般会計								
	特別会計 (需給)	300	312	260	(300)	(300)	1,472		
	開発成果 促進財源								
	総 NEDO 負担額	300	312	260	(300)	(300)	1,472		
	助成(1/2)	300	312	260	(300)	(300)	1,472		
3.3 研究開発計画									

	情勢変化への対応	2021年度初頭より半導体不足が顕在化し、IT向け半導体と異なり、産業機器向け半導体不足が続いており、設備導入が遅れるなど影響が認められたため、以下の対応を行った。 <ul style="list-style-type: none"> <li>保有済みの小型実験機により製造条件の検討を進め、本検討結果を活用により、設備導入後の製造条件最適化の時間短縮を図る</li> <li>技術推進委員会による計画変更の妥当性の確認／了承</li> <li>計画の変更へ対応した予算の変更</li> </ul>	
	評価に関する事項	事前評価	2020年度 事前評価実施 担当部 環境部
		中間評価	2023年度 中間評価実施 担当部 環境部
		終了時評価	2026年度 終了時評価実施 担当部 環境部
別添			
	投稿論文	「査読付き」3件	
	特許	「出願済」2件	
	その他の外部発表 (プレス発表等)	「外部講演」16件 「展示会への出展」1件 「プレスリリース」2件	
6. 基本計画に関する事項	作成時期	2021年2月の作成	
	変更履歴	2021年12月に改訂 (PMの変更)	



## プロジェクト用語集

### 研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

#### 「溶融塩使用固体電解によるアルミ合金スクラップからの高純度アルミ精製技術の開発」

用語	説明
AC2A	Al-Cu-Si 系の鋳物用アルミニウム合金の一種。 Cu:3.0~4.5% , Si:4.0~6.0%を含む。Cu を含むことから耐食性にはやや劣るが引張り強さには優れている。
AC2B	Al-Cu-Si 系の鋳物用アルミニウム合金の一種。 Cu:2.0~4.5% , Si:5.0~7.0%を含む。AC2A より Cu が若干多く、高強度で耐熱性が良好。
AC3A	Al-Si 系の鋳物用アルミニウム合金の一種。 Si:10.0~13.0%を含む。流動性に優れるとともに耐食性にも長けた材種であるが、耐力が低いという難点もある。
AC4C	Al-Si-Mg 系の鋳物用アルミニウム合金の一種。 Si:6.5~7.5% , Mg:0.2~0.4%を含む。Cu を含まないため耐食性に優れ、耐圧性もある。
ADC12	Al-Si-Cu 系のダイカスト用のアルミニウム合金の一種。 Si:9.6~12% , Cu:1.5~3.5%を含む。機械的性質、被削性、鋳造性が良くバランスの整っている合金。
Al 回収率	アノードから溶解した Al の量に対して、カソードに電析した Al の量の百分率。
Hall-Héroult 法	アルミニウムを溶融塩電解により製錬する方法。ボーキサイトから製造した無水純アルミナ $Al_2O_3$ を 1100℃ 前後の溶融氷晶石中に溶かし込み、炭素電極で電気分解することで陰極にアルミニウムが析出する。
SPCC 材	最も一般的な鋼板で熱間圧延軟鋼板を、常温状態で圧延した冷間圧延鋼板です。炭素鋼の一つであり、炭素鋼の中でも炭素含有量が 0.1%未満と少ない。 流通量が多く加工性が良いことから、工業製品から建築資材まで様々な箇所に使用されている。
アノード	外部回路から電流が流れ込む電極（外部回路へ電子が流れ出す電極）。
インゴット	金属を精製して一塊としたもの。
インピーダンス測定	交流信号を回路に印加したときの電圧と電流の比を取った値(インピーダンス:単位 $\Omega$ )の測定には、バッテリーに交流信号(電圧もしくは電流)を印加し、電圧と電流を同時に測定し、得られた信号の比(電流/電圧)から求める。周波数応答アナライザ(FRA : Frequency Response Analyzer)が幅広く用いられている。 実験で得られた結果を、ガウス関数を用いてインピーダンス解析を行うと、イオンの電気化学反応の電位と電子数を求めることができる。
カソード	外部回路へ電流が流れ出す電極（外部回路から電子が流れ込む電極）。
共晶	冷却の過程で、一つの融液から二つ以上の固相が密に混合した組織への変化、またはその反応で生じた組織。
矩形波ボルタンメトリー (Square Wave Voltammetry: SWV)	非常に低濃度のイオン( $10^{-6} \sim 10^{-9}$ mol/L)の検出に使用する電解分析の測定法。容量(充電)電流を最小化し、ファラデー電流を最大化することにより低濃度のイオン検出が可能となる。波形は大きな振幅の矩形波と階段波形を組み合わせたもので、パルス電圧の印加直前点と終了点の 2 点の電流値を測定。このデータを使用してインピーダンス解析ができる。
固体溶融塩電解	固体（アルミニウムスクラップ）を溶融塩中で電気分解する手法（造語）。
サイクリックボルタンメトリー(CV)	電極の電位を特定の範囲で掃引させそれに応じて流れる反応電流を測定する。電位をプラス方向に振った後に、ある値から折り返してマイナス方向に振る。イオンの電気化学反応の酸化および還元反応の電位を求めることができる。

作用電極	電気化学実験系のうち、対象としている反応が実際にその表面上で起こっている電極をいう。本法では、アルミ電析が起こるカソードを指す。
製錬(Smelting)	広義には、鉱石中に含まれる目的の金属を脈石や不純物から分離して、純金属または合金として取り出す操作。狭義には、鉱石から金属を取り出す操作をいう。高温処理を伴う乾式製錬と溶液中で化学処理を行う湿式製錬に分類される。
精錬(Refining)	製錬(Smelting)で得られた金属を電解製錬等で純度の高い金属にする操作。今回の固体熔融塩電気分解は精錬(Refining)に分類される。
耐圧性	圧力に耐えることのできる性質、またはその度合いを意味する。
耐力	材料が耐えうる力のこと。耐力を超えた力をかけた時その材料は塑性変形を始める。
ダイカスト材	ダイカストは鑄造に分類される加工法の一つであり、溶湯を型に圧入する鑄造方法である。ダイカスト材とはダイカストにて鑄造することを前提にした材料。
鑄造材	鑄造とは溶湯を金型に入れて冷やして固めていく加工法であり、鑄造材とはこれに使用することを前提にした材料。
展伸材	展伸材とは、金属を圧延・鍛造・引抜き・押し出し等によって形状を作り出した材料。
電解浴	熔融塩がるつぼに装入されて溶解している状態を電解浴と称する。
電析	金属が電気化学的に析出する現象あるいは機構に関する表現。無機非金属の析出をも含める。金属の電析は、金属イオンの溶液内拡散を無視すると、電荷移動過程(放電)と放電により生成した吸着原子の結晶化過程に分けられる。
電流効率	電気化学反応において、通過電流量から計算される理論生成量に対する目的生成物量の実測値の百分率。ファラデーの法則によると、電気化学反応による生成物の量は通過電流量に比例し、同一電流量による反応生成物の量はその化学当量に比例する。金属のカソードへの析出を考えると、金属の析出以外に、水素の発生、溶存酸素の還元、析出金属の脱落など、目的とする電析物の量を減少させるいくつかの要因がある。
電流密度	単位面積に垂直な方向に単位時間に流れる電流量(電荷)であり、電流量についての流束である。
被削性	切削加工のしやすさのこと。
引張り強さ	材料の強度を示すパラメーターの一つ。材料に引張り荷重を加えて破断するまでに生ずる最大の力のこと。
品質のマップ化	色々な組成のアルミスクラップを本法を適用したときのカソード付着物の組成と量を一覧できるマップとすること。
陽極泥	陽極においてイオン化することなく、極板から離れて電解層の底に沈む沈殿物。
熔融塩電解	高温で熔融状態の金属塩を電解浴とし、これに目的金属の化合物を溶かし込んで、電解分解により金属を陰極に析出させる方法。
リアスweepボルタンメトリー(LSV)	電極電位を連続的に変化させ流れる電流値を測定する電気化学測定の基本。電極の電位を特定の範囲で掃引させ、それに応じて流れる反応電流を測定する。片方向のみに電位を振る。イオンの電気化学反応の酸化あるいは還元反応の電位を求めることができる。

研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

「資源循環社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

①-1 溶解技術による不純物元素低減技術

用語	説明
AC4C 合金	金型鑄造において使われることが多い合金。シリコン 6.5～7.5%、マグネシウム 0.25～0.45%を含む一方、銅は含まないため、耐食性に優れ、耐圧性もある。
α-Al 相	熔融状態にあるアルミニウムが凝固する際、先に凝固する純度の高い相。
EDX	電子線照射により発生する特性 X 線を検出し、エネルギーで分光することによって、元素分析や組成分析を行う手法。電子顕微鏡に付属する。
ICP	高周波誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma) を用いた発光分光分析法の一つ。分析試料にプラズマのエネルギーを外部から与えることにより成分元素を励起し、その励起された原子が低いエネルギー準位に戻るときに放出される発光線 (スペクトル線) を測定する。
SEM	走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope)。電子線を試料に当てて表面を観察する装置。
押出	固体状態で成形を行う塑性加工の一種であり、素材を圧縮してダイスと呼ばれる金型から押し出し、必要な形状の断面を形成する。非常に複雑な断面形状を形成できる。
共晶	液体から同時に 2 種類以上の結晶の混合物が析出する現象。
サッシスクラップ	アルミサッシから発生するスクラップ。マグネシウムとシリコンが含まれる 6000 系合金が用いられているが、ビスに起因する鉄が混入することがある。
収率	供給原料の量に対する製品量の比率。
ダイカスト	鑄造法の一つで、金型に熔融した金属を高速・高圧で流し込むことにより、高い寸法精度の鑄物を短時間に大量生産する方法。
ダイカスト用合金	ダイカストによって成形するのに適した合金。型の中に充填した後、高い圧力を加えることによって鑄巣の発生を抑えるため、凝固しにくいことが求められる。アルミニウム用としてはシリコンの含有量が多い ADC12 合金が多く用いられている。
鍛造	金属の塑性加工法の一つ。金属をハンマーや金型で叩いて圧力を加えて変形させる手法。組織が緻密となり、鑄造に比べて鑄巣 (空洞) ができにくいので引張強度・硬さに優れた粗形材をつくることができる。
鑄造用合金	熔融した金属を型の中に流し込み、成形する合金。シリコンを添加することによって融点を下げ、凝固潜熱を高くすることにより型の中を流れやすくしている。
展伸用合金	圧延、鍛造など固体状態で成形する合金。一般に含まれる合金元素量は低く抑えられている。
電磁攪拌	電磁誘導により非接触で攪拌を行う方法。導体に対し移動する磁場が加わると、それを打ち消す方向に誘導電流が流れ、この誘導電流と磁場により発生するローレンツ力により、磁場の移動方向に力が加わる。
ドロス	アルミニウムを溶解する際、溶けたアルミニウムの上に発生する不純物。アルミニウムを含む酸化物や塩化物であり、圧搾などによりアルミニウムを回収した後、鉄鋼の脱酸剤などに再利用される。
熱交換器由来スクラップ	熱交換器から発生するスクラップ。3000 系合金と分類されるマンガンを含む合金が用いられている。
分別結晶法	溶解度の差を用いることによって物質を精製する手法。合金の場合、凝固の際に液体と固体で元素の溶解度が異なるため、これを利用して純度を向上させることが可能。
熱交換器由来スクラップ	熱交換器から発生するスクラップ。3000 系合金と分類されるマンガンを含む合金が用いられている。
平衡分配係数	平衡状態に達したとき、溶質が二つの溶媒の間で分配される割合。本研究では、固体と液体の間で溶質元素分配される割合を示しており、低いほど分離が容易。
包晶	2 成分からなる液体のなかに一方の成分の結晶が共存している場合に、液体がこの結晶と反応して別の結晶をつくり、もとの 1 成分の結晶を包み込んだ状態の結晶。

①-2 溶解前処理によるスクラップ組成制御技術の開発

用語	説明
2D/3D 画像情報	二次元画像（RGB カラー画像）及び三次元画像（グレースケールで物体高さを表現した画像）から得られる情報。
2D/3D 画像センサー	本研究における 2D 画像センサーとは、ライン式の RGB カラーカメラを意味する。また、3D 画像センサーとは、光切断法を用いたレーザースキャナーを意味し、帯状のレーザー光を対象物表面に照射し、その反射光の変化を受光することで、非接触で高さ・段差・幅などのプロファイル（断面形状）を測定し、連続的に得たプロファイルデータを画像処理することで対象物の三次元画像を取得する。
2000 系合金	銅を主要な添加元素とする Al-Cu 系合金。強度は高い。使用量は少ない。
3000 系合金	マンガンを主要な添加元素とする Al-Mn 系合金。主な用途は缶胴材。
5000 系合金	マグネシウムを主要な添加元素とする Al-Mg 系合金。一般材として広く使用される。
6000 系合金	ケイ素とマグネシウムを主要な添加元素とする Al-Si-Mg 系合金。建材等で広く利用される。展伸材の中では最も多く使用される。
7000 系合金	亜鉛を主要な添加元素とする Al-Zn-Mg 系合金。アルミニウム合金の中で最も強度が高い。使用量は少ない。航空機などに用いられる。
BEADS 法	グラフデータのバックグラウンド補正（ベースライン処理）の一手法。Baseline Estimation And Denoising using Sparsity の略。
IoU	画像認識の評価指標として広く使用される値。0 から 1 までの値を取り、1 に近いほど予測領域が正解領域に一致していることを示す。Intersection Over Union の略。
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy（レーザー誘起ブレイクダウン分光法）。レーザーを照射し発生するプラズマの発光スペクトルを分析することで元素含有量を測定する。
LIBS ソータ	LIBS を利用した選別機。
鋳物	溶湯を型に入れて凝固させた製品。塑性加工を行っていないので延性、靱性は低い。
渦電流選別	アルミ等の非磁性金属が磁界を通過すると内部に生じる渦電流と、磁石の磁界との反発作用を利用した選別方法。鉄と非鉄金属をより精密に分別する。
画像認識ソータ （ARENNA ソータ）	産総研が過去に開発した画像認識による廃棄物ソータ。ベルトコンベヤ上に設置したレーザースキャナーで計測した対象物の 3D 特徴量（体積、投影面積、縦長、横長、最大高、重心点高、周囲長、表面凹凸度等）を全結合型ニューラルネットワークに入力して選別する。ARENNA とは Apparent Recognition with Neural Network Analysis の略。
教師データセット	深層学習において、AI モデルの学習に用いるデータの集合。画像データとアノテーションデータ（対象物の位置とクラスを記述したデータ）で構成される。
固体発光分光分析	金属試料をスパーク放電により励起し、発光スペクトルを観察することで、成分分析を行う分析方法。アルミニウムメーカーでは、一般的な成分分析の方法として用いられている。
重液選別	比重が 1 より重い液を使って選別する方法。アルミニウムと銅、亜鉛、ステンレス等の重金属を分別する。
磁力選別	磁石の磁力を利用して選別する方法。主に鉄と非鉄金属を分別する。
セマンティックセグメンテーション	深層学習の一手法で、AI モデルに入力する画像を構成する各画素に対して、その画素が属するクラスを予測する手法。
走査型 LIBS ソータ	ベルトコンベヤの幅方向位置によらずに対象物の三次元形状を検知し、LIBS 分析用レーザー光の焦点位置を三次元的に制御することで、対象物の表面上において元素分析を行うポイントを能動的に選択可能な LIBS ソータ。「走査型分光ソータ」とは同義。
走査型分光ソータ	ベルトコンベヤの幅方向位置によらずに対象物の三次元形状を検知し、LIBS 分析用レーザー光の焦点位置を三次元的に制御することで、対象物の表面上において元素分析を行うポイントを能動的に選択可能な LIBS ソータ。「走査型 LIBS ソータ」とは同義。

風力選別	風のカや性質を利用して選別する方法。主に金属等の重量物と紙、塵、プラスチック等の軽量物を分別する。
プラズマ発光スペクトル	原子がイオンと電子に分離した際に見られる発光現象における光の波長毎の強度分布。

## 研究開発項目② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

### 「資源循環社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

#### ②-1 縦型高速双ロール鋳造を用いた不純物無害化技術

用語	説明
CC	薄板連続鋳造のこと。Continuous Casting の略。
DC 鋳造	現在アルミニウムの量産に使われている厚い鋳塊を鋳造する技術。DC は Direct Chill の略。
延性	材料を引張った際に切れずに伸びる特性。
晶出物	溶湯中に含まれる元素が凝固時に母相と異なる第二相として生成したもの。
韌性	材料の脆さのこと。硬さ（強度）とは相反し、硬い材料ほど脆い（韌性が低い）。
塑性加工	金属の塑性（荷重を加えると割れずに永久変形する特性）を利用した加工法。
縦型高速双ロール鋳造	一対の回転するロールの上から溶湯を流し込み、薄肉の板材に鋳造する製造法。冷却速度が早く、生産性も高いが、板表面性状、組織の均一性、板厚などの制御が難しくアルミニウムでは実用例がない。
展伸材	圧延、押出、鍛造等の塑性加工を施した材料で、延性、韌性に優れている。
転造加工	工具を回転している加工対象物に押し当て、盛り上げることで加工すること。
溶湯湯面高さ	ノズル内の湯面とロールまでの距離。高さが変動するとロール面にかかる溶湯の圧力が変動し、品質に影響する。
ロール荷重	双ロールで材料がロールを押し上げようとする力。凝固完了点がロール最近接部より手前にあるほど大きくなる。
ローレット加工	施したい凹凸と同じ模様の工具を棒また円筒状の被加工物に押し付けて回転させ、工具の形状を転写することで成形する加工法。雄ネジの加工や歯車などの加工に広く使われている。

#### ②-2 加工熱処理による不純物無害化技術

用語	説明
5083	代表的な構造用アルミニウム材料。代表組成は Al-4.5%Mg-0.8%Mn。
6022	代表的な自動車ボディ材用アルミニウム合金。代表組成は Al-1%Si-0.5%Mg。
6061	代表的な構造材用アルミニウム合金。代表組成は Al-0.6%Si-1%Mg-0.3%Cu。
ARB	繰り返し重ね圧延 Accumulative Roll Bonding の略。50%圧延後、二等分し重ねて再度 50%の圧延をする。これを繰り返すことで板厚の変化なしで大きな歪み量が得られる。
ASTMG85A1	ASTM は American Society for Testing and Materials の略で、米国試験材料協会のこと。G8A1 は腐食試験の規格で、酢酸塩噴霧試験を示す。
HPS	高圧スライド加工。High Pressure Slide の略。板面に圧力を加えつつ、スライドさせてせん断歪みを導入する。
HPT	高圧ねじり加工。High Pressure Torsion の略。板面に圧力を加えつつ、ねじってせん断歪みを導入する。
IF-HPS	逐次繰り出し高圧スライド加工。Incremental Feeding High Pressure Slide の略。板を少しずつ繰り出して HPS を行うことで大面積を加工する。
T4、O、H19	アルミニウムの調質記号。T4 は溶体化焼入れ後常温で保持。O は焼鈍した軟質材。H19 は冷間圧延で硬化した硬質材で通常の H18 よりさらに高い冷間加工を加えたもの。
巨大歪み加工	圧延や鍛造などの通常の加工法では導入が困難な歪みを与える加工法。

高力アルミニウム合金	熱処理によって高強度が得られるアルミニウム Al 合金の総称。Al-Cu 合金、Al-Mg-Zn 合金などが代表例。
時効	所定の温度に保持することで時間と共に硬くなる現象。室温で保持することを自然時効、炉中で 150～200℃程度の温度で保持することを人工時効と呼ぶ。
焼鈍	焼きなましのこと。高温で保持して柔らかくした後、徐冷することで軟化した状態に保つ処理。
せん断歪み	物体の内部の任意の面に関して面に平行方向に力が作用することで導入される歪みのこと。
調質	材料の熱処理、冷間加工などの最終仕上げ状態のこと。
ハイテン	高張力鋼材のこと。近年では引張強さ 1.5GPa 程度の材料が実用化されている。
ビッカース硬さ	最もよく使用される硬さ試験法。ダイヤモンドでできた剛体（圧子）を被試験物に対して押し込み、そのときにできるくぼみ（圧痕）の面積で硬さを測る。
焼入れ	溶体化処理後、急冷することで固溶した元素を溶け込んだままにすること。
溶体化	添加した元素をアルミニウム固相中に溶かし込むこと（固溶）。高温で保持する。

### ②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術

用語	説明
A5083-O	輸送機器の部品など、様々な用途に使用されている構造用 5000 系アルミニウム合金。テーマ②-3において、成形シミュレーション技術整備の共通試験材として使用した。
r 値	単軸引張試験における、試験材の幅方向対数歪みを板厚方向対数歪みで除した値。同じ素材でも引張り方向によってこの値が大きく変化する場合があり、そのような素材は不均一な変形挙動を示し、前述の耳が拡大する傾向にある。
圧延方向	金属板を薄くする圧延工程において、板が 2 本のロールの間を通過し延ばされる方向。ロール目とも呼ばれる。
穴広げ成形試験	中央に円形の穴を空けた試験片に対し、円筒パンチを用いた張出成形を行い、試験片の穴縁近傍に発生する歪みを測定する試験方法。
液圧バルジ成形試験	円盤形状の金属板の端部を拘束した状態で、板中央に液圧を負荷して球状に変形させる成形試験。ここでは、変形中の液圧と球面頂点の変形（歪み）を測定し、素材の多軸応力特性を測定する試験方法。
外接多角形による降伏関数	特殊な試験機を必要としない 3 種の材料試験（単軸引張試験、平面歪み引張試験、液圧バルジ試験）を行い、異方性降伏曲面を同定する方法。なお、降伏曲面の同定においては、関連流れ則（降伏曲面の法線方向と塑性歪み速度が一致する事）を仮定する。
缶胴	飲料缶の側壁部。
結晶塑性有限要素法	金属材料の結晶構造や結晶の向き、すなわち結晶方位に依存した弾塑性変形挙動の数値シミュレーション方法。アルミニウム合金の集合組織の違いによる弾塑性変形挙動を解析することができる。
降伏関数	素材の多軸応力特性を、数式で表現したもの。高次でパラメータが多い関数ほど、実際の特性を精度良く表現できるが、パラメータを同定するために高度な評価試験を多数実施する必要がある。
降伏曲面	単軸および多軸応力下で、材料に塑性変形が生じる限界となる応力値を結んだ曲面。
再絞り成形	上記の円筒絞りを行った成形品に対し、径のより小さな円筒パンチを使って再度絞り成形を行い、小径の円筒型カップ形状に成形する事。
絞り成形	加工対象である金属板の外周をダイス・ホルダーと呼ばれる一対の金型にて挟んで把持しつつ、金属板の中央にパンチと呼ばれる金型を押し当てる事で、カップ状や箱状の形状に成形する事を意味する。ここでは、円筒形状のパンチで対象の金属板を加工し、円筒型カップ形状に成形する事を指す。
スプリングバック	金属板を曲げた後、材料の弾性回復によって曲げ角度が少し戻ること。
多軸応力特性	素材に対して、2 軸以上の方向の応力を加えた条件での、素材の変形抵抗力などの特性。

単純せん断試験	試験片に対して純粋なせん断変形を与え、その際の応力－歪み関係を採用する。
チャック	単軸引張試験において、引張試験片の両端を把持する治具。
等塑性仕事面	多軸応力下で材料に変形を与えた際、材料に与えた塑性仕事（塑性変形によるエネルギー）が等しい応力値を結んだ曲面。材料に与えた変形が小さい場合には、降伏曲面に等しいとみなされる。
二軸引張試験	評価材を十字形に切断した試験片（十字引張試験片）に対し、それぞれの軸方向に試験力を負荷し、試験力と応力測定部に生じる歪みを測定する事で、素材の多軸応力特性を測定する材料試験方法。
バウシガ効果	前の負荷と逆方向に負荷を与える（ある方向へ引張変形を与えた後に圧縮変形を与えた場合など）と、降伏応力が減少すること。
パンチ肩 R	成形品の円筒形状のうち、平坦な底面と、筒状の側壁部をつなぐ、円弧断面部位を指す。
平面歪み引張試験	一般的な引張試験は試験片が引張り直交方向へ縮み変形を起こすのに対し、当試験法は試験片が引張り直交方向に変形しない状態（平面歪み状態）で引張変形を与える。本研究では、引張試験片の幅を広く、引張り方向寸法を短く設定するなどして、この状態を実現した。
耳	板をカップ形状に絞り成形すると、成形品のエッジが波打った形状になる場合がある。その波の形状、もしくは、波の高低差を耳と呼ぶ。

#### ②-4 LCA・戦略策定支援

用語	説明
PS	所定（一般的に 0.2%）の歪みが生じた時点での応力を 0.2%耐力（proof stress）と呼び、降伏点とみなす。
TS	引張強さ（tensile strength）。物質の引張力に対する最大の強度。
イベントリデータ	LCA 評価のもととなる、評価対象の製品・サービスのライフサイクル全体における各ステージの投入・生産・廃棄される物量をまとめたデータ。
延性	材料を引張った際に切れずに伸びる特性
温室効果学ガス（GHG）	二酸化炭素やメタン、フロン類など、地球温暖化に寄与する物質の総称。二酸化炭素を基準単位として、排出量を計算する。
強度	物質表面の機械的性質の一つであり、異物によって変形や傷を与えられようとする時の変形しにくさ、傷つきにくさ。
ソーシャルネットワークサービス（SNS）	Twitter や Facebook をはじめとしたユーザー間でコミュニケーションを行うためのサービスの総称。
ライフサイクルアセスメント（LCA）	製品やサービスの環境負荷を、ライフサイクル全体で評価するための方法論。

#### ②-5 運営・規格

用語	説明
ISO 化	ISO（International Organization for Standardization の略；国際標準化機関）が制定する国際的な材料規格に登録すること。登録することで認知度がアップすると共に利活用が活発になる。
JIS 化	JIS（Japanese Industrial Standards の略；日本産業規格）が制定する材料規格に登録すること。登録することで認知度がアップすると共に利活用が活発になる。一般に JIS 規格に合金を追加するためにはある程度、普及されて使用実績があることが求められる。
規格化	開発した合金を広く、普及させるために JIS 規格や ISO 規格に落とし込むこと。ここでは、国際合金登録、JIS 化、ISO 化の流れを指している。
合金の標準化	開発した合金の化学組成、機械的性質などの物性値等の諸特性を公知させることで広く活用を図るために、JIS や ISO 等の規格に落とし込むことを指す。

合金番号	アルミニウム材料は一般には、4桁の番号でその材料を示す。(既存の合金に極めて組成が近い場合は、4桁の番号の後にアルファベット記号を付け、5桁表記する事も有る)
国際合金登録	AA (米国アルミニウム協会) が管理するアルミニウム合金の国際合金登録制度のリスト (Teal Sheet) にアップされること。これにより、合金番号でその組成範囲などが公開されることとなる。合金の標準化の最初のステップ。商業的な需要またはニーズがあり、継続的に生産販売されるもので、実験室規模の量ではないことが必要である。

# 1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

## 1.1. 事業の位置付け・意義

### 1.1.1. 背景

近年、人口増加とそれに伴う資源・エネルギー需要の拡大、廃棄物量の増加、温暖化をはじめとする環境問題の深刻化が予測され、あらゆる経済活動において“循環経済（Circular Economy:CE）”への転換が求められている。アルミニウムは、資源循環向上の取組が特に期待される素材であり、輸送機器の軽量化等、CO<sub>2</sub> 排出量削減を目的とする用途において需要の大きな伸びが予測されているが、電解製錬により新地金を製造するため、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量原単位が 11.1kg- CO<sub>2</sub>eq/kg と大きいという課題がある。一方、再生地金は、再生のためのエネルギー消費が小さく、その排出原単位が新地金の 1/20 以下と少ないことから、SDGs、CSR、ESG 投資などの影響により需要が増大しつつある低環境負荷のアルミニウム素材として活用が期待されている。ただし、アルミニウムスクラップのリサイクル過程で混入する不純物により、再生地金は一部の用途に使用が限定される状況にある。従って、低環境負荷型の再生地金の使用用途を拡大するための高度なリサイクル技術の開発は、アルミニウム素材を利用する国内製造企業における製品の環境性能向上を可能とし、資源制約の克服や地球環境問題の解決に貢献すると同時に、わが国企業の競争力向上につなげることができる。

なお、アルミニウムのバリューチェーンには、リサイクル産業、合金メーカー、圧延メーカー、自動車メーカー等のユーザー企業と、多くの業界が関わっており、単一の企業・業界での研究開発は限界がある。バリューチェーンの一体的な取り組みが必要であるため、国が橋渡し役として各ステークホルダー間を繋ぐ必要がある。さらに、市場形成の不確実性が高い分野であることから、国の主導の下、循環システムの構築の方向性を示す必要がある。

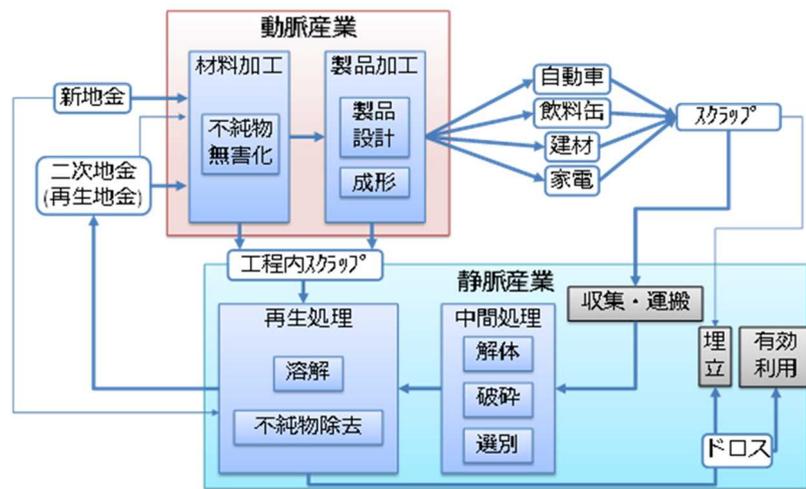


図 1.1 アルミニウムのリサイクルシステム

出典：NEDO TSC Foresight Vol.35 より

### ・市場の状況

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）技術戦略研究センター（以下「TSC」という。）の世界のアルミニウム市場規模・予測の調査によると、軽量性、耐食性、熱・電気伝導性、加工性等、優れた性質を有するアルミニウムの需要は右肩上がり増加している。図 1.2 に示すように、世界のアルミニウム需要は 2017 年に 9,000 万トン/年を超え、中国を中心に 2040 年までに 1 億 6,000 万トン/年に増加すると予測されている。

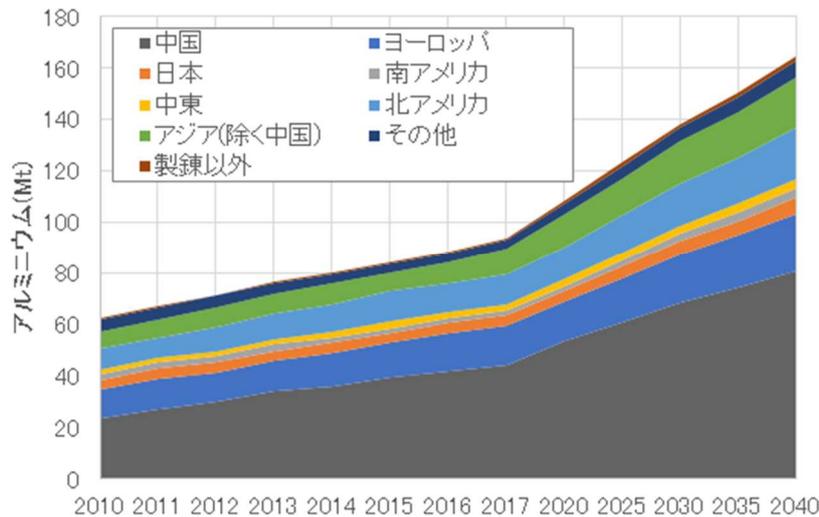


図 1.2 世界におけるアルミニウム需要の推移と将来予測

出典：NEDO TSC Foresight Vol.35 より

また、用途別のアルミニウム中間製品需要量の予測を図 1.2 に示す。これまでのアルミニウム需要は建築・構造用途と自動車等運輸用途が牽引しており、将来的にも建築・構造及び運輸用途の需要の伸びは大きく、2040 年ではそれぞれ約 5,000 万トン/年程度の需要へ成長すると予測されている。

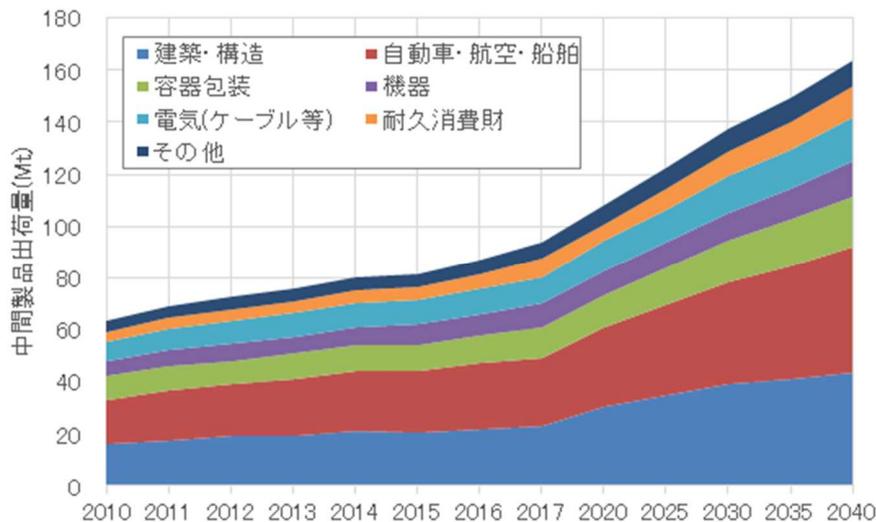


図 1.3 世界におけるアルミニウム中間製品の出荷量の推移と将来予測

出典：NEDO TSC Foresight Vol.35 より

・ 国内における現状

2016 年の日本におけるアルミニウムの年間需要量は 381 万トン/年である。材料として利用されるアルミニウムのうち、251 万トン/年が新地金由来であり、主に高付加価値な展伸材向けに利用されている。

国内では新地金の製造は行われておらず、ほぼ全量を海外からの輸入に頼っている残りの 130 万トン/年は二次地金（いわゆるリサイクル材料）である。そのほとんどは鋳造材として用いられており、エンジンブロックが主な用途として挙げられる。また、130 万トン/年が国内で回収されたスクラップとして回っており、アルミニウムのリサイクル率としては世界トップレベルであるといえる。

今後、自動車用エンジンの小型化、パワートレインの電化の進展により、国内における鋳造材需要の減少が見込まれる一方で、軽量化の要求から自動車向け展伸材需要の増加が想定されている。また、アルミニウムの需要量は増加しており、今後排出されるスクラップも増加することが予想されるため、需給バランスが将来的に崩れる可能性が高い。

### 1.1.2. 本事業の目的

本事業は、アルミニウム素材の高度資源循環を実現するため、溶解工程高度化による不純物元素軽減技術、鋳造・加工・成形技術高度化による微量不純物無害化技術などを組み合わせることにより、アルミニウムスクラップから高性能な再生展伸材を開発する。図 1.4 に本事業に関わる経済産業省予算の PR 資料を示す。

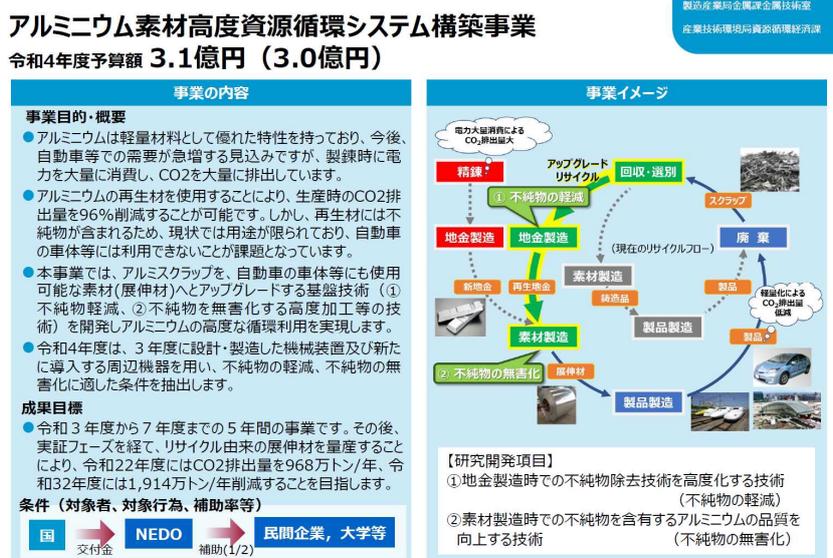


図 1.4 資源循環システム高度化促進事業 経済産業省予算の PR 資料

[https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan\\_fy2022/pr/en/sangi\\_taka\\_25.pdf](https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2022/pr/en/sangi_taka_25.pdf)

この資料に記載されている様に、本事業の社会背景と事業の目的は、

#### ・社会背景

アルミニウムは軽量材料として優れた特性を持ち、今後、自動車等での需要が急増する見込みだが、製錬時に電力を大量に消費し、CO<sub>2</sub>を大量に排出する。

アルミニウム再生材の使用により、生産時のCO<sub>2</sub>排出量を96%削減が可能だが、再生材には不純物が含まれるため、現状では用途が限られ、自動車の車体等には利用できないことが課題である。

#### ・事業の目的

本事業では、アルミスクラップを、自動車の車体等にも使用可能な素材(展伸材)へとアップグレードする基盤技術(①不純物元素低減、②微量不純物を無害化する高度加工技術)を開発し、アルミニウムの高度な循環利用を実現するものである。

### 1.1.3. 本事業の将来像

アルミニウムは、特長となる軽量・高強度な材料として今後大きな需要の伸び(国内での使用量、蓄積量の増加)が予想されることから、国内において高効率、低コストなアルミニウムリサイクル技術の開発が期待されている。しかし、資源採掘から製造、利用、廃棄に至る全ての段階のCO<sub>2</sub>排出(ライフサイクルCO<sub>2</sub>)が重要視される製品にとって、

新地金製造時の CO<sub>2</sub> 排出量の大きさがアルミニウム利用拡大の課題となっている。この抑制のため、新地金製造プロセスの低炭素化、リユースシステム、リサイクル利用に関する新しい技術開発が欧米を中心に行われている。国内では、新地金製造プロセスを担う産業が存在しないことから、循環によるライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出の抑制が、主なユーザーである自動車産業、容器利用産業等によって行われることを想定する。

#### 1.1.4. 政策・施策における位置づけ

2018 年 7 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、鉱物資源の自給率の目標が示されている。2030 年にベースメタル（銅・亜鉛）の自給率を 80%以上、戦略レアメタル（レアアース・リチウム・タングステン等）については 50%以上とすることを目指している。また、戦略レアメタルについては備蓄を着実に進め、供給途絶等の緊急時に需要家のニーズに応じて機動的に放出等できるよう備蓄体制の整備を進めていくとされている。さらに、日本再興戦略 2016（2016 年 6 月）では、「『都市鉱山』の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄製錬業者等の成長を図るため、情報技術等を活用し、動静脈連携によりレアメタルなどの金属資源を効率的にリサイクルする革新技术・システムを開発する。」という方針が定められている。

また、第四次循環社会形成推進基本計画（2018 年 6 月）によれば、「鉄、アルミニウム、銅等ベースメタルのリサイクルを一層促進するため、高度破碎設備や合金成分も加味できる高度選別設備の開発・導入を支援するとともに、二次原料利用量拡大に資する基準等の検討を行う。」という記載、革新的環境イノベーション戦略（2020 年 1 月）では、「金属等（アルミニウムを含む）の循環利用を進めることで原料からの一次製錬が不要となり CO<sub>2</sub> の大幅な削減が記載される。」の記載、循環経済ビジョン 2020（2020 年 5 月）では、「リサイクル技術の高度化・多角化を検討していくにあたっては、ベースメタル（鉄、アルミニウム、銅等）、セメント、紙、ガラス、プラスチック等の主要素材について、改めて今後の需給見通しや再生材の利用可能性についての評価・分析をしていくことが重要である。」の記載があり、これら政策の下で本事業は推進されている。

#### 1.1.5. 技術戦略上の位置付け

本研究開発を実施する上での技術戦略上の位置付けとして、図 1.5 に NEDO 技術戦略研究センターが作成した、NEDO TSC Foresight Vol.35 に記載されている日本におけるアルミニウムのマテリアルフローを示す。



図 1.5 日本におけるアルミニウムのマテリアルフロー

出典：NEDO TSC Foresight Vol.35 より

国内でのアルミニウムのマテリアルフローでは、新地金は電気代の安価な海外から 141 万トンが、それ以外にもアルミニウム合金地金として 110 万トン輸入され、また国内のリサイクルアルミニウム材 130 万トンが材料となる。これらを基にアルミニウム材料の展伸材として 185 万トン程度、鑄造材として 143 万トン程度が中間品として製造され、この後

製品に加工される。国内では再生地金として 130 万トンのアルミニウムがリサイクルされるが、水平リサイクルループが確立されている 3000 番系のアルミニウムからなるアルミニウム缶を除き、現状ではアルミニウム材料としてクオリティが低い鋳造材としてカスケードリサイクルされる。

この様な中、図 1.6 に示すように、アルミニウム材料に関しては、展伸材の需要は大幅に伸び、それに対して鋳造材の需要の伸びは緩やかであることが予想されている。

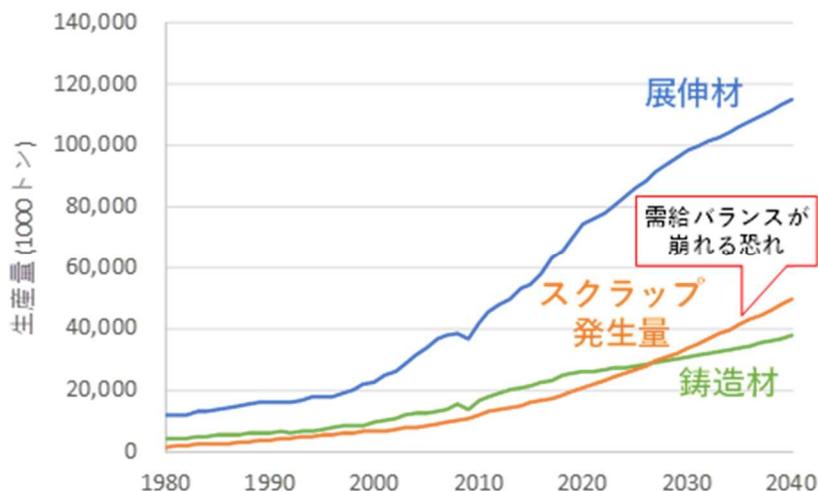


図 1.6 世界におけるアルミニウム素材の生産予測

出典：Regional Aluminum Flow 2017

そのため、現状の鋳造材での利用を想定したカスケードリサイクルを続けると、将来発生するスクラップ量が鋳造材の需要を超えることが予測され、アルミニウムの水平リサイクル技術の開発が強く望まれる。また先にも述べた様に、アルミニウムの再生地金は、再生のためのエネルギー消費が小さいため、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を大きく削減できる。

リサイクルの工程としては、自動車や飲料缶、建材、家電等に材料として利用されたアルミニウムは、それぞれの廃棄処理ルートを経て収集され、スクラップとして静脈産業にてリサイクル処理が行われる。最初に中間処理業にて再生処理に適した原料となるよう解体・破碎・選別等の前処理が行われ、次いでアルミニウム合金業にて再生処理として溶解・不純物除去等の成分調整を行い、二次地金として動脈産業に供給される。

動脈産業では、二次地金と新地金から材料・製品に求められる性能に応じた材料加工・製品加工を行い、市場に供給する。表 1.1 に各処理工程における要素技術とその内容についてまとめた。

表 1.1 アルミニウムリサイクル技術の体系

工程	要素技術	具体的な技術例
中間処理	解体	廃製品を部材に分離
	破碎	部材を素材単位に分離
	選別	素材ごとの分離・濃縮
再生処理	溶解	リサイクル材の溶解
	不純物低減	ガス成分、不純物元素の除去、低減
加工処理	材料加工	不純物の存在下でも物性を確保
	成型加工	低物性材料の使いこなし、水平リサイクル
	製品設計	中間処理効率化のための製品形態・構造設計

### 1.1.6. 国内外の動向との比較

#### • EU の動向

EU は従来の資源消費型の線形経済から、資源効率を最大化する循環経済への転換を図り、2015 年に CE パッケージをビジョンとして策定した。EU は「EU 域外の資源産出国から供給される天然資源に依存しない、いわゆる EU 域内で完結する循環資源利用の社会を目指し、再生品の品質が市場を決定する（リサイクル業者のための）市場を作りたい」と考えている。これは「バージン資源使用製品に対してリサイクル資源使用製品の競争力を強化する」ということを意味している。この CE（Circular Economy：循環経済）パッケージの中で、アルミニウム製容器包装について、2025 年には 50%、2030 年には 60%のリサイクルを目標と設定している。

また、フィンランドのシンクタンクである SITRA のレポートでは、アルミニウムの循環において重要なポイントを次のように挙げている。

- 再使用： 直接再使用の推奨
- 水平リサイクル： 現状のカスケードリサイクルの防止
- 新たな製品解体プロセス： 自動化、素材混合の防止
- 分離・選別の向上： 安価なセンサー、自動化による低コスト化
- 洗練されたスクラップ市場： フローの把握
- 新たな製造プロセス： 不純物除去・精製

EU では CE に関するビジョンや分析に基づき、Horizon2020 の中で研究開発プロジェクトを進めている。CE は Horizon2020 の中で横断的活動として焦点領域に設定されており、各産業分野（建設、自動車、家電、住宅、太陽光発電、紙・パルプ産業等）から廃棄される製品中の鋼材、銅、アルミニウム、チタン、プラスチック、ガラス、複合材料など、経済的に回収するための技術開発・システム開発・制度設計を 2013 年から 2019 年にかけて総額 120 億円程度支援している。

その中で、アルミニウムの循環に関連する主要なプロジェクトについて表 1.2 にまとめた。EU では、製錬、地金製造、材料加工、スクラップ選別等、バリューチェーンを網羅するように研究開発プロジェクトが進められている。

表 1.2 EU における主要なアルミニウム循環の研究開発プロジェクト

名称	コーディネーター	概要	期間 EU 予算 (PJ 予算)
ENSUREAL	SINTEF (ノルウェー)	改良 Pedersen 法を用いて低品質のボーキサイトからのアルミナ精製を行うことで、EU 領域内での持続的なアルミニウムバリューチェーンを構築する。	2017/10~2021/9 9.0 億円 (11.2 億円)
Aluminium ScrapDbase	BRUNEL UNIVERSITY LONDON (イギリス)	鉄不純物を含むアルミニウムスクラップ合金を使用して、高価値アルミニウム製品を製造することを可能にする方法を、固化挙動や結晶生成挙動を解析することにより開発する。	2015/9~2017/8 0.6 億円 (0.6 億円)
Recycal	LENZ INSTRUMENTS SL (スペイン)	アルミニウムスクラップを鍛造材に適用するため、高剪断加工 (HSP) 技術を用いた溶融調整プロセスにより、機械的特性を改善する微細構造を実現した。	2014/1~2016/12 3.0 億円 (4.0 億円)
REALCAR2	Jaguar Land Rover Limited (イギリス)	使用済アルミニウムを使用して、低コストでエネルギー効率良く、5000 番台のアルミニウムを使用して、軽量の車体構造を構築するための技術開発を行なった	2013/2~2015/7 0.7 億円 (0.7 億円)
REALITY	Jaguar Land Rover Limited (イギリス)	アルミニウム合金を分離し、その後展伸アルミニウム合金を合金種別毎に、さらに分離するための、センサーベースのスクラップソーティング技術の開発および産業展開を目指してスケールアップを行なった。	2017/6~2020/3 2.0 億円 (3.0 億円)
SHREDDER SORT	LENZ INSTRUMENTS SL (スペイン)	自動車スクラップからの非鉄金属を選別し、二次アルミの品質を向上させるため、LIBS等のセンサーによる casting/展伸アルミ合金の選別技術の開発を行う。	2014/1~2016/12 4.2 億円 (5.6 億円)
HR-Recycler	Ethniko Kentro Erevnas Kai Technologikis Anaptyxis (ギリシャ)	WEEE をリサイクルするための前処理における人間とロボットの協働によるソーティングプラントシステムを開発する。	2018/12~2022/5 8.8 億円 (8.8 億円)

• 米国の動向

米国では、資源循環に関する取組は、製造業のエネルギー効率と経済性を向上させ、産業の競争力を強化する目的で行われている。米国エネルギー省（DOE）のエネルギー効率・再生可能エネルギー局（EERE）が2017年5月に Reducing Embodied-Energy and Decreasing Emissions (REMADE)として、リサイクルやリユース全般に関する総額75億円、5年間の資金提供プログラムを開始した。REMADEプログラムの技術的達成指標として、主に以下のような目標が掲げられている。

- 製造プロセスにおけるバージン材料投入量を30%削減
- 製造プロセスにおける二次材料投入量を30%増加
- エネルギー集約型材料のリサイクルを30%増加
- 二次材料のコストをバージン材料と同等程度にする
- 5年以内に二次原料処理エネルギーを30%削減
- 10年以内に50%削減

REMADEプログラム及びエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）のプログラムを表1.3に示す。ARPA-Eではエネルギー消費低減を目的に、次世代の自動車や構造材として需要が高まることが予想される軽金属（Al、Mg、Ti）をターゲットに、省エネルギー・低コストなアルミニウム精錬技術と廃製品からのリサイクル技術を開発している。特に、自動車スクラップからの軽金属合金の選別を目的としたソーティング技術の開発が行われており、REMADEプログラムに繋がっていると考えられる。

表 1.3 REMADE、ARPA-E プログラムにおけるアルミニウムリサイクル関連技術開発プロジェクト

プログラム名	名称	コーディネーター	概要
REMADE	Rapid Sorting of Scrap Metals with Solid State Device	The University of Utah	非鉄金属スクラップからアルミニウムを EDX (electro-dynamic sorting) 技術により高選別効率・ハイスループットで選別する技術の開発。1t/h の処理速度、90%の回収率を目指す。
	Increasing Melt Efficiency and Secondary Alloy Usage In Aluminum Die Casting	Ohio State University	アルミダイキャスト製造における、溶融プロセスの熱力学モデリングにより機構を解明し、高効率な溶融プロセスのための新たな添加剤、耐火材の開発や、より不純物許容度の高い二次アルミニウム合金の製造プロセスの設計を行う。North America Die Casting Association, Alcoa が参加。
ARPA-E	ALUMINUM ELECTROLYTIC CELL WITH HEAT RECOVERY	Alcoa	アルミニウム精錬の効率向上、コスト低減を目的に、電解セルの高効率化と熱回収に関する技術を開発した。
	ALUMINUM PRODUCTION USING ZIRCONIA SOLID ELECTROLYTE	INFINIUM	アルミニウム精錬の効率向上、CO <sub>2</sub> 排出抑制を目的に、電解精錬において従来の炭素電極からジルコニア電極へと転換するための技術を開発した。
	ELECTROMAGNETIC LIGHT METAL SORTING	University of Utah	自動車からのアルミニウムスクラップを複数グレードに選別するため、可変電磁力による選別技術を開発した。
	ELECTROCHEMICAL PROBE FOR RAPID SCRAP METAL SORTING	Palo Alto Research Center	自動車からのアルミニウムスクラップを複数グレードに選別するため、イオン液体を用いた高速な電気化学分析による選別技術を開発した。
	X-RAY DIAGNOSTICS FOR SCRAP METAL SORTING	UHV Technologies	自動車からのアルミニウムスクラップを複数グレードに選別するため、線形 XRF (蛍光 X 線)を用いたソーターによる選別技術を開発した。

• 中国の動向

中国は国家戦略として循環経済体制の構築を行っている。第 13 次 5 年計画や中国製造 2025 の中で、製造業の強化方針の一つにグリーン製造の発展を挙げており、その主要目標として工業固形廃棄物の再利用率を 2013 年の 63% から、2020 年までに 73%、2025 年までに 79% に引き上げようとしている。また、国家発展改革委員会は、「循環発展牽引行動」の中で資源循環産業市場は 2020 年に 50 兆円規模に拡大すると予測しており、それを実現させるため十大大行動として、資源循環利用産業モデル地区の建設、鋳業資源総合利用産業蓄の建設、「インターネット+」資源循環の取組、再生製品普及の取組、技術革新の取組などを挙げている。

アルミニウムの循環に関しては、2011 年から 5 年間、廃アルミニウム缶のリサイクル技術の開発プロジェクトが国家科学技術支援プログラムの支援の下中国再生可能資源産業技術革新戦略同盟及び北京科学技術大学、中北大学、Zhaoqing Dazheng Aluminium Co.,Ltd. が共同し、CAN to CAN のグリーンリサイクル技術を開発し、社会実装している。

• 日本の動向

2018 年 7 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、鋳物資源の自給率の目標が示されている。2030 年にベースメタル（銅・亜鉛）の自給率を 80% 以上、戦略レアメタル（レアース・リチウム・タングステン等）については 50% 以上とすることを目指している。また、戦略レアメタルについては備蓄を着実に進め、供給途絶等の緊急時に需要家のニーズに応じて機動的に放出等できるよう備蓄体制の整備を進めていくとされている。さらに、日本再興戦略 2016（2016 年 6 月）では、「『都市鋳山』の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄製錬業者等の成長を図るため、情報技術等を活用し、動静脈連携によりレアメタルなどの金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発する。」という方針が定められている。

1.2. アウトカム達成までの道筋

本事業は 2 つの研究開発項目から構成され、それぞれに中間目標、最終目標を設け研究開発を実施した。最終目標はこのち表 2.1 に示すが、本事業の各研究開発成果とアウトカム達成までの道筋を図 1.7 に示す。

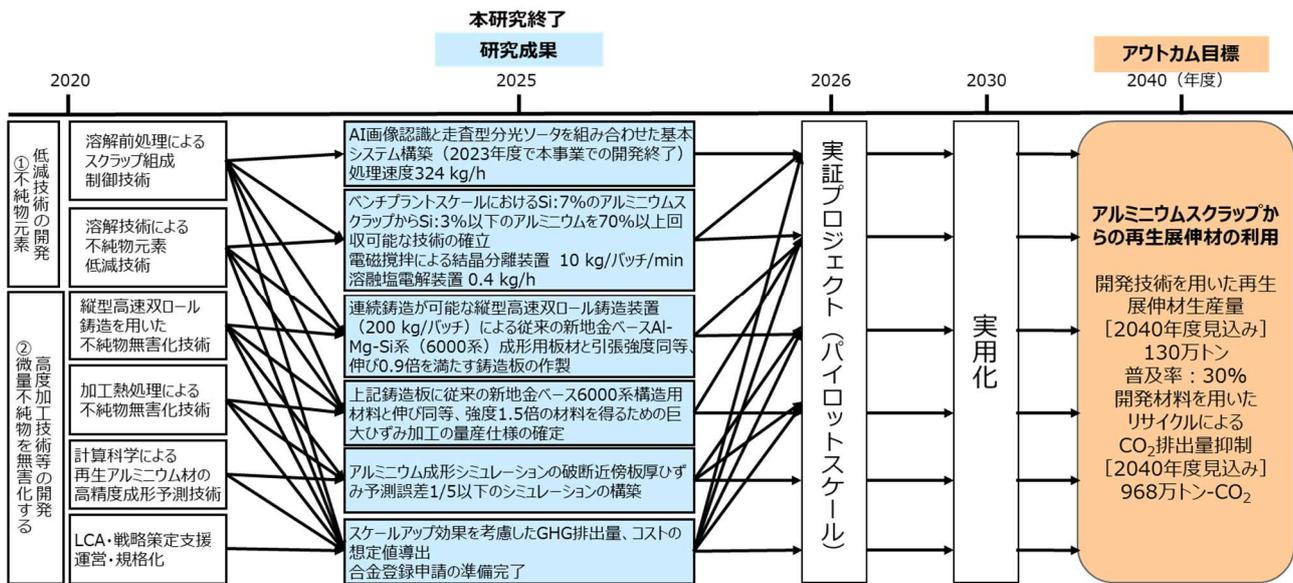


図 1.7 本事業のアウトカム達成までの道筋

この図に示す通り、2つの研究開発項目を実施し、最終目標を2025年度末に達成する事で全体システム実証技術開発のフェーズに移行し、数年このフェーズで実証を行った後、2030年に2つの研究成果の実用化により実際の事業所等への設備導入を進める。実用化の後2040年には生産設備としての事業化を進め、130万トン/年の再生展伸材を市場に供給し、新地金の使用量を削減することで、968万トン/年の二酸化炭素排出の削減に繋げることを計画した。

### 1.3. 知的財産・標準化戦略

本事業を始めるにあたり、注目する分野、知財創出のキーワード等を実施者が決め、知的財産の創出に取り組んでいる。

- 知的財産に関する戦略

- オープン領域：再生展伸材の規格（不純物元素含量）、性状

- クローズ領域：各種開発技術（助成事業参画企業間には自由に利用）

- 国内アルミニウム関連事業者には特許の実施を許諾（非独占的通常実施権）

- 基本特許（バックグラウンド特許）を基とした知財創出活動

- （①不純物元素低減技術5件、②微量不純物を無害化する高度加工技術等5件）

- 知的財産や研究開発データに関する取扱いルール

- 再生展伸材のリサイクル（製造含む）に関連する特許は積極的に取得

- 国際標準化戦略・計画

- 再生展伸材の標準化を推進

- 各プロセスでの試作結果に基づき、再生合金の規格化に向けて登録する材料を選定

- 開発材料とその周辺特許を出願し特許網を構築した後、合金登録申請が出来る準備を整える

- プレス発表、国内外の学会、展示会等で開発材料のPRを実施

また、知的財産の管理に関しては、

- 知的財産権の帰属

- 助成事業の実施によって得られた知的財産権等の研究成果は、助成先に帰属

- 届出

- 助成事業の実施期間中または助成事業年度の終了後5年以内に、助成事業の成果を学術誌等で発表した場合、助成事業に基づく発明、考案等に関して、産業財産権等を出願または取得した場合及びそれらを譲渡し若しくは実施権を設定した場合には、「産業財産権等届出書」を提出（交付規定 第9条第1項第十六号）

- 助成先（事業者）における管理

- 知財合意書の締結（助成先11社、共同研究先12機関）

- 知財運営委員会において情報を管理（審議案件受理後、関係者に資料を送付し書面審議）

- 6回の書面審議（15案件）を実施

とし、発明委員会、知財運営委員会の開催にて管理を行っている。



## 2. 目標及び達成状況

### 2.1. アウトカム目標及び達成見込み

#### 2.1.1. アウトカム目標の設定及び根拠

本事業は基本計画にアウトカム目標を記載している。アウトカム目標はアウトプット目標を達成する事により、事業終了後実証期間を経てアウトカムへとつなげていくものであり、本事業のアウトカム目標は以下となる。

#### 【アウトカム目標】

2040 年度までにアルミニウム圧延業界を中心に再生展伸材の製造技術を確立し、普及率 30%に当たる再生展伸材生産量 130 万トン/年、CO<sub>2</sub> 削減量 968 万トン/年を達成する。さらに、2050 年度までに中長期アウトカム再生展伸材生産量 257 万トン/年、CO<sub>2</sub> 削減量 1,914 万トン/年を達成する。これにより、アルミニウム素材の高度資源循環システムの社会実装へと展開する。その結果として、国内企業における製品の環境性能向上による国際競争力強化、及び幅広い産業における温室効果ガス排出量削減を実現する。

このアウトカム目標の根拠は以下になる。

- International Aluminium Institute の需要予測によれば日本国内におけるアルミニウム展伸材生産量は、2019 年 269 万トン、2040 年 432 万トン、2050 年 513 万トンと今後大幅に増加。
- 本研究開発によって再生展伸材を利用可能とし、その普及率を 2040 年に 30%、2050 年 50%とすると、削減される新地金輸入量 2040 年 130 万トン、2050 年 257 万トンとなる。再生展伸材単価を 500 円/kg とすると、相当する市場規模は 2040 年 6,500 億円、2050 年 1 兆 2,900 億円程度となる。また、本技術での再生展伸材の利用によって、2040 年 968 万トン、2050 年 1,914 万トンという温室効果ガス排出量削減効果が得られる。

このアウトカム目標へ向けて、本事業でのアウトカム達成の見通しを図 2.1 に示す。

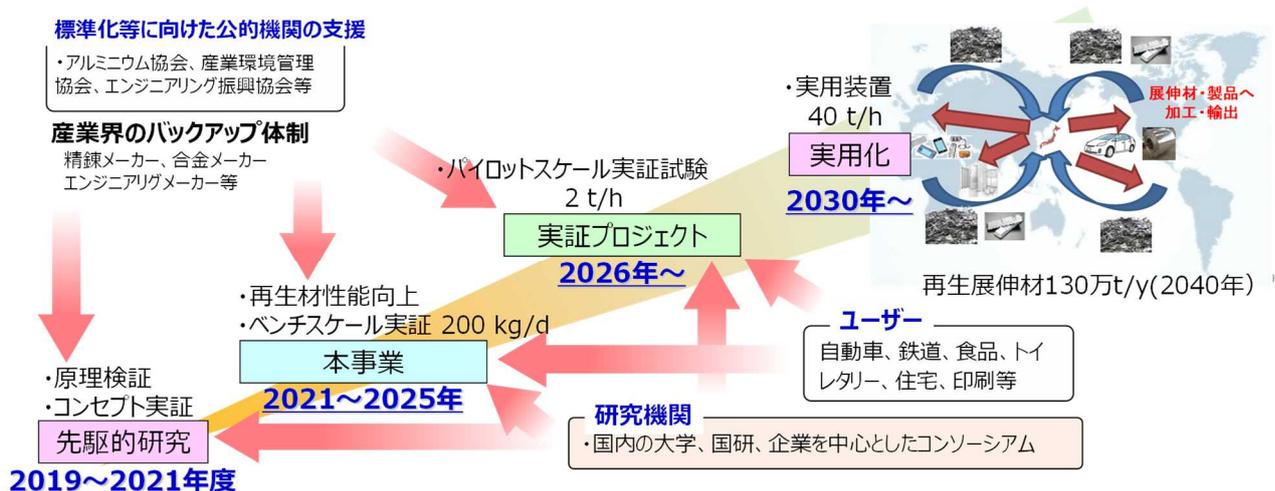


図 2.1 アウトカム目標の達成見込み

本事業を終了する 2026 年 3 月時点では、ベンチスケール実証試験機で 200 kg/day の製造能力を有することが研究開発の成果目標であるが、以降実証試験機の改良・能力向上に取り組むことによって 2030 年までに 2t/hour に製造能力を向上させ、2040 年には 40t/hour の能力を有する実用製造装置を複数台導入することを想定しており、その結果としてアウトカム目標である 130 万トン/年の再生展伸材アルミニウム製造を見込んでいる。

### 2.1.2. 波及効果

この事業では、再生展伸材の利用先の一つとして自動車分野を想定している。再生したアルミニウム展伸材を自動車車体に使用することによる自動車の軽量化（1台当たり71kg）を波及効果と想定する。

国土交通書の車両重量と燃費の関係から、71kgの軽量化は燃費改善効果として0.75km/Lと見込むことが出来、自動車の標準的な燃費を23.1km/L、ガソリン1L当たりのCO<sub>2</sub>排出量を2.7kg-CO<sub>2</sub>/L、1台が年間に走行する距離を11,840kmと仮定すると、

- 2040年に想定される展伸材アルミニウム使用自動車約2500万台  
 $11,840\text{km} \div 23.1\text{km/L} \times 2.7\text{kg-CO}_2/\text{L} \times 2500\text{万台} \approx 35\text{百万 t-CO}_2$   
 $11,840\text{km} \div (23.1 + 0.75)\text{km/L} \times 2.7\text{kg-CO}_2/\text{L} \times 2500\text{万台} \approx 34\text{百万 t-CO}_2$   
この差からCO<sub>2</sub>排出量の削減は約112万t-CO<sub>2</sub>
- 2050年に想定される展伸材アルミニウム使用自動車約4600万台  
 $11,840\text{km} \div 23.1\text{km/L} \times 2.7\text{kg-CO}_2/\text{L} \times 4600\text{万台} \approx 63\text{百万 t-CO}_2$   
 $11,840\text{km} \div (23.1 + 0.75)\text{km/L} \times 2.7\text{kg-CO}_2/\text{L} \times 4600\text{万台} \approx 61\text{百万 t-CO}_2$   
この差からCO<sub>2</sub>排出量の削減は約205万t-CO<sub>2</sub>

この様に、2040年、2050年においてアルミニウム展伸材が利用されることで、自動車の走行時におけるCO<sub>2</sub>の排出量削減の効果を想定する。

### 2.1.3. 本事業における実用化の考え方及び見込み

本事業は、不純物元素低減技術の開発と微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発の目標を達成することで、アルミニウムの資源循環に資するものである。市中で発生する数多くのアルミニウム合金種が混在したまま鋳造材量としてカスケードリサイクルされている中、本技術開発で水平リサイクルのためのパイロットプラントスケールでの実証を終了し、アルミニウムに関する事業者等が、これらの技術を用いてアルミニウムの再生展伸材の製造を開始することを実用化と定義する。

本事業では各技術の基礎検討は順調に進んでおり、2023年度以降の実証設備の導入による、製造技術確立のための検討を着実に行うことでアウトカム目標を達成する見込みである。

### 2.1.4. 費用対効果

後の表3.2 本事業の研究開発項目別の研究開発費用にも掲載するように、2021～2025年度までの本事業の研究開発の総費用見込みは補助率1/2の助成事業で15億円程度である。これに対し、アウトカムで想定している再生展伸材売り上げ予測は2040年度で6,500億円を見込んでいることから、十分な費用対効果があると想定する。

## 2.2. アウトプット目標及び達成状況

### 2.2.1. アウトプット目標の設定及び根拠

#### • 研究開発項目①不純物元素低減技術の開発

スクラップ鋳造材にはSiが多く添加され、展伸材への再生を阻害する要因となっており、Si除去をメインターゲットとする。再生対象のアルミニウムと再生後のアルミニウム地金に関しては以下の条件とする。

- Si濃度:自動車スクラップのSi濃度より上限はSi 7%
- 目標値:後工程において適用可能な値としてSi 3%

- ・回収率:新地金との価格競争力を持つため収率 70%程度が必要

これより、以下の様に中間目標、最終目標を設定。

【中間目標】2024年3月

Si:5%以上を含むアルミニウムスクラップから Si:3%以下の再生アルミニウムを 70%以上回収可能とする技術を開発する。

【最終目標】2026年3月

Si:7%以上を含むアルミニウムスクラップから Si:3%以下の再生アルミニウムを 70%以上回収可能とする技術を開発する。

- ・研究開発項目②廃微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

Al-Mg-Si系合金は展伸材中、最も多くSiを含み、Mgの添加量、熱処理条件によって強度レベルを広く振ることが可能なため、再生材使用展伸材に最適であり、微量不純物無害化の検討対象とした。この時、以下の条件を満たすことが再生展伸材として必要である。

- ・伸び 0.9 倍程度を確保できれば、成形シミュレーション技術を使うことで、殆どのプレス成形が可能
- ・引張強度 1.5 倍を達成できれば、最高強度のアルミニウム合金 7050 や、1.5GPa 級超ハイテンを代替でき、自動車用途など広く再生材への展開が可能

これより、Si:3%を含む再生材を使用した Al-Mg-Si系（6000系）合金で、以下の特性を有する材料を得るため、アルミニウム展伸材と構造材に対して以下の様に中間目標、最終目標を設定。

#### 成形用板材

【中間目標】2024年3月

従来の新地金ベース Al-Mg-Si系（6000系）成形用板材（引張強度 250 MPa、伸び 30%）と引張強度同等で、伸び 0.8 倍。

【最終目標】2026年3月

従来の新地金ベース Al-Mg-Si系（6000系）成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.9 倍。

#### 構造用材料

【中間目標】2024年3月

従来の新地金ベース Al-Mg-Si系（6000系）構造用材料（引張強度 333 MPa、伸び 15%）と伸び同等で、引張強度 1.2 倍。

【最終目標】2026年3月

従来の新地金ベース Al-Mg-Si系（6000系）構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.5 倍。

## 2.2.2. アウトプット目標の達成状況

本事業の研究開発項目2つのアウトプット目標（中間目標）の達成状況、今後の課題等を表2.1に示す。

表 2.1 最終目標に対する成果と今後の課題

研究開発項目	中間目標	成果	計画との差異	今後の課題と解決方針
①不純物元素低減技術の開発	Si:5%以上を含むアルミニウムスクラップからSi:3%以下の再生アルミニウムを70%以上回収可能とする技術を開発する	溶融塩電解小規模ベンチプラント (処理量:0.03 kg/h) Si:10.8%⇒0.2% アルミ回収率 58.7%	○ 2024年3月 目標達成 見込み	溶融塩混入に影響を与える、 下記因子の条件を変更し、回収率向上を図る ①溶融塩中 Al3+濃度 ②電流密度 ③電極板面積
		電磁攪拌ラボ装置 (溶湯:100g 程度) Si:7%⇒3.3% アルミ回収率 60% Si:5%⇒3% アルミ回収率 70%	○ 2024年3月 目標達成 見込み	先行して Si 以外の不純物元素除去などの課題解決に向けラボレベルでの実験を実施する
②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発	従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系 (6000 系) 成形用板材 (引張強度 250MPa、伸び 30%) と引張強度同等で、伸び 0.8 倍	ロール荷重・ロール周速・ロール形状・ノズル形態を工夫し T4 材にて 引張強度同等 (250MPa) 伸び 0.8 倍 (24%) を達成し 目標をクリアした (小型実験機)	△ 一部未達	縦型高速双ロール casting: 長尺実験機完成後、速やかに最適操業条件を確立し中間目標 (従来材の引張強度同等で 0.8 倍の伸び) を達成するため、小型実験機、広幅短尺実験機を活用し、特性改善のための casting 条件を確立する
	従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系 (6000 系) 合金で、以下の特性を有する材料を得るための技術を開発する。	HPS 加工:伸び同等 (14%) 引張強度 1.4 倍 (473MPa) IF-HPS による大型化(幅 200mm)達成 ARB 加工:伸び同等 (17%) 引張強度 1.2 倍 (399MPa)	○ 2024年3月 目標達成 見込み	加工熱処理: IF-HPS 加工または ARB 加工と熱処理条件の組合せにより、最適なプロセスと加工方法について条件を選定し、板幅 200mm 以上で中間目標 (従来材と同等の伸びで引張強度 1.2 倍) を達成する

本研究での2つの研究開発項目において、②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発に関して計画の一部未達となった。縦型高速双ロール casting 技術の開発では、世界的な半導体不足により制御装置等の導入遅延が発生し、装置の導入が遅れている。遅延のリカバリーとして小型実験機や広幅短尺実験機での検討により基礎データの取得を進め目標値の達成を確認した。縦型高速双ロール装置の完成後、これらの基礎データを用いて迅速に装置稼働を進める予定である。

### 2.2.3. 研究開発成果の意義

本事業の研究開発項目2つの研究開発成果とその意義を表2.2に示す。

表 2.2 研究開発成果と意義

研究開発項目	研究開発による具体的な成果物	成果物の意義
①不純物元素低減技術の開発	<p>・本法(アルミニウム合金スクラップ中元素の殆どを除去し高純度アルミニウムを得る技術)に関する            (1)製造装置            (2)製造方法            (3)装置運転方法            (4)製造システム(対象とするアルミ合金スクラップの配合方法、用途開拓方法)            ・本法のライセンス供与</p> <p>溶解工程では、テストプラントにおいて圧搾及び電磁攪拌によるα-Al 相分離技術を確立。実験室レベルでの結果を基に、テストプラントにおける操業条件を改善。テストプラントで作製したリサイクルアルミニウムについて、自動車用途の評価、熱交換材用途の評価、缶材用途の評価といった基本的な評価結果をまとめる。プラント化においては、他者侵害立証の困難な製造プロセスのノウハウ化。溶解前処理では、走査型分光ソータを用いた大量処理による元素組成制御の限界と必要なコスト(費用・時間)の明確化。2D/3D 画像情報に基づいて分光用レーザーの集光照射ポイントを自動的に決定する走査型分光ソータ用の制御システムの開発。各種スクラップの溶解前処理における再生材アルミニウムの評価指標。また、2023年6月までに、知財権確保のための特許出願1件、社会的アピールとして対外発表3件の成果がある。</p>	<p>現在のアルミニウムリサイクルは、アルミニウム以外の元素含有率が高い鋳造・ダイカスト材へのカスケードリサイクルとなっており、リサイクル回数が増加するほどアルミニウム以外の元素含有率が上がる。スクラップからアルミニウム以外の元素を除去する技術が確立されていないことから、再利用できないアルミニウムスクラップ量が必然的に増加することになる。本法によって、世界で初めて、スクラップ中のアルミニウム以外の元素(Si, Cu, Zn, Fe, Mg, Mn等)のほとんどを除去して高純度 Al(&gt;99%)が得られることになる。</p> <p>従来技術である連続分別結晶法では、Si 濃度 1.5%程度までのスクラップをターゲットとしており、展伸材由来のアルミスクラップのみが対象であった。これに対し、本技術では、共晶組成である Si12.6%以下のスクラップに対して適用が可能となる。これは、既存の鋳造用アルミニウム合金の大半を対象とすることができることを示している。これにより、スクラップの供給量不足や、スクラップの価格変動に対して柔軟に対応できるようになるなど実操業上の課題が解決でき、従来技術において実用化に向けた問題点を解消することが可能となる。</p> <p>さらに、溶解前処理では、従来の走査型分光ソータは、表面分析に基づく選別のため、表面の平滑性が高く、ある程度浄化された無垢材料に対象が限定され、表面の形状が不規則な破砕片や表面に異物が付着したスクラップに対して判定不能や誤認率が高くなるという問題があった。これに対し、本技術では、分光センサーの前端に配置した 2D/3D 画像センサーによりスクラップの外観と形状を検知し、深層学習を活用した AI 画像認識によって表面に付着している鉄製ボルト、ビス、塗膜等を瞬時に検出して、分析用レーザーの集光照射ポイントを自動的に選択する 3D 位置制御システムを開発する。</p> <p>従来技術での展伸材へのリサイクルは、展伸材由来のアルミスクラップのみが対象であった。しかし溶解前処理を含むこの不純物低減技術は、展伸材由来のみならず鋳造材由来のスクラップの大半を対象として展伸材へリサイクルできる。これにより、スクラップの供給量不足や価格変動に対して柔軟に対応できるなど、実操業上の課題を解決でき、従来技術において実用化に向けた問題点を解消することが可能となる。</p>
②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発	<p>200mm幅の長尺縦型高速ダブルロール鋳造実験機(長尺縦型実験機)を導入し、定常状態における鋳造条件を最適化。600mm幅短尺縦型高速ダブルロール実験機(広幅短尺縦型実験機)の成果を合わせて、広幅長尺連続操業時の設備仕様、製造条件を確立。さらに、HPT(高圧ねじり加工)、HPS(高圧スライド加工)、ARB(繰返し重ね接合圧延)の巨大ひずみ加工を施し、その後時効処理を行うプロセスで高強度、高延性化が可能であることを実証し、本プロセスが、Si含有量の多い鋳物材を含むスクラップからのアップグレードリサイクルに適していることを実証。大型化は IF-HPS と ARB を適用(最終的な実用化にあたっては、両者で用途に応じて使い分けするか、どちらか一方の選択を行う)。さらに、成形シミュレーションにより再生アルミニウム材の材料モデルを構築することで、実成形試験結果と成形予測結果との整合性を検証し、成形限界線図を測定することで、実成形部品への適用の可能性を見極めることが可能となる。さらには、研究開発項目①②の各テーマの中で、準備の整ったテーマに関して、LCA, AI 解析を実施。また将来需要推計については、モデルの開発やモデル検証に向けたケーススタディを実施。さらには、国際規格化による標準化を実施。また、2023年6月までに、知財権確保のための特許出願1件、社会的アピールとして対外発表12件の成果がある。</p>	<p>研究開発項目①「不純物元素低減技術開発」において、鋳物屑を含む多様なアルミニウムスクラップの不純物元素を減らすことを目指しているが、従来の展伸材レベルまで低減するには、ソースとなるアルミニウムスクラップを厳しく選別する必要があり、必要な量の確保や、コスト的に現実的でない。従って低品位屑を大量に使用してアップグレードリサイクルを実現するには、ある程度の不純物が存在しても、展伸材としての特性、特に延性を保つことが可能な製造プロセスが必須である。不純物による延性低下の原因は主に凝固時に生成する粗大な晶出物であり、これを微細に分散することができれば延性の低下を抑制することが可能となる。さらに、再生展伸材は、Si や Fe などの不純物元素を多量に含み、延性・靱性が低下する傾向にある。したがって、プレス加工において、割れやしわといった成形不具合を生じやすくなり、実用・普及の障害となる。そこで、再生展伸材の成形不具合を成形シミュレーションで予知し、成形不具合が発生しないための最適な加工条件を決定する手法が有効となる。</p> <p>従来技術は、個々の研究開発テーマを単独で行っているが、本プロジェクトは、溶解工程から鋳造・加工・熱処理及びユーザー評価まで一貫したプロセスを構築でき、さらには成形予測や LCA 解析まで行うことから、実証試験を効率よく行え、実用化のスピードが格段にアップする。さらには、国際規格化により広範囲な普及が図れるとともに国際競争力も向上する。</p>

## 2.2.4. 副次的成果及び波及効果

本事業の研究開発項目2つとプロジェクト全体を通じた副次的成果を表2.3に示す。

表 2.3 副次的成果

研究開発項目	副次的成果
①不純物元素低減技術の開発	開発装置（電磁攪拌装置）の従来合金（リサイクル合金以外）への展開 <ul style="list-style-type: none"> <li>・電磁攪拌装置による組織微細化などの展伸材用アルミニウム素材の特性向上</li> <li>・Fe、Mnなどの除去による、鋳造用アルミニウム合金の特性向上</li> </ul>
②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発	開発装置（縦型高速双ロール鋳造機）の従来合金（リサイクル合金以外）への展開 従来合金の製造に適用することで、均質化処理及び熱間圧延といった鋳造後工程の省略が可能 <ul style="list-style-type: none"> <li>・製品製造時間の短縮</li> <li>・消費エネルギー、CO<sub>2</sub>発生量の削減（板材製造全エネルギーの約1/4）</li> <li>・増産体制構築に有効（同程度の製造能力で価格1/5、設置面積1/10）</li> </ul>
プロジェクト全体	OJTを通じた当該分野における技術者の育成 <ul style="list-style-type: none"> <li>・溶融塩電解によるアルミニウム精錬技術者</li> <li>・総合的な材料設計技術の習得</li> <li>・異業種、異分野連携の重要性認識</li> </ul>

本研究開発による副次的な成果としては、①不純物元素低減技術の開発では、研究開発の基盤技術である金属溶湯の電磁攪拌によって金属組織の微細化が期待されることから、新品の展伸材アルミニウム素材の特性向上につながる可能性があり、また、②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発では、この技術開発の基盤技術である縦型高速双ロール鋳造によって従来の展伸材アルミニウム製造工程に必要な均質化処理工程、熱間圧延等が不要になり、製品製造時間の短縮や、製造に必要なエネルギーの削減、製造工程が簡略化されることから、設備設置面積を小さくすることが出来、設備増設を行う場合のメリットとなる。

## 2.2.5. 特許出願及び論文発表

本事業の2023年5月23日時点での特許出願数、論文発表数、新聞雑誌等への掲載の結果を表2.4に示す。

表 2.4 特許出願及び論文発表等の件数

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	2 (0)	0 (0)	- (-)	- (-)	2 (0)
論文	0	3	3	-	-	6
研究発表・講演	1	9	6	-	-	16
受賞実績	0	0	0	-	-	0
新聞・雑誌等への掲載	0	2	0	-	-	2
展示会への出展	0	1	0	-	-	1

本事業では、事業実施者のバックグラウンド特許を基に、知財の創出等を行い、2件の特許出願、それ以外にも学会誌への論文投稿も精力的に行っている。

### 3. マネジメント

#### 3.1. 実施体制

##### • NEDO が実施する意義

本研究開発は以下に示す 3 つの観点からも NEDO がもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業であると考えられる。

- アルミニウムのリサイクルに関わる問題の解決は国の方針に沿った重要課題であり、本事業によるアルミニウム再生材の展伸材への利用ならびに CO<sub>2</sub> 排出量の削減は社会的必要性が高い。
- NEDO ではこれまでに培ってきた各種素材のリサイクル技術の開発で得た知見や成果、ネットワークを活用し中長期的な技術開発を行うことが可能。
- 研究開発の難易度が高く、必要な投資規模が大きく、また実用化までのリードタイムが長いことから、民間企業だけではリスクが高い。

表 3.1 に示す資源循環関連事業を示すように、他機関でも複数のアルミニウムリサイクルに関する研究開発が行われていることがわかる。この表の中の項目 4 は、NEDO で行われた先導研究事業であり、この事業でアルミニウムスクラップの不純物を低減する技術と微量不純物存在下での材料特性向上技術の基盤技術の検討を実施した。この研究成果を基に国研、大学、企業が結集し、共通基盤技術から実用化を目指すための研究開発を本事業として開始したものである。

表 3.1 アルミニウムリサイクル関連事業

項目	実施機関	プロジェクト名	期間	事業タイプ	事業内容
1	経済産業省	省エネ型アルミ水平リサイクルの LIBS ソーティング実証事業	2014 ~2015	補助事業	リサイクル工程の高度化に資する、金属スクラップ（アルミニウム、銅）の高効率・高度選別技術等の実証を行う。
2	NEDO	「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業	2016 ~2018	補助事業	鉄道車両のアルミニウム材料を水平リサイクルすることを目的に、LIBS ソーティング技術によるアルミニウム合金選別システムの開発および実証を行う。
3	環境省	省 CO <sub>2</sub> 型リサイクル等高度化設備導入促進事業	2018 ~2020	補助事業	使用済製品等のリサイクルプロセス全体のエネルギー起源二酸化炭素の排出の抑制及び再生資源の回収効率の向上を図るための省 CO <sub>2</sub> 型リサイクル等高度化設備を導入する経費の一部を補助する。
4	NEDO	アルミニウム素材の高度資源循環システム構築	2019 ~2021	委託事業 (先導研究)	アルミニウムスクラップから不純物元素を低減する技術を開発するとともに、微量不純物存在下で材料特性を向上させる技術を開発し、両者の組み合わせで、再生アルミニウムが展伸材として利用可能となるか検証する。
5	JST	共創の場 形成支援プログラム	2022 ~	基盤研究	不純物を含むアルミニウムスクラップからの再生地金の利用を可能とする研究開発を行う。また、資源循環社会モデルを地域（富山）の産官学民の全ステークホルダーと共に構築し、新市場への進出を支援する。さらに、持続的・自立的な産学官の共創システムを構築し、富山で資源循環社会モデルを創成する。

・実施体制

(1)実施体制の決定

本プロジェクトは、NEDO 先導研究である「アルミニウム素材の高度資源循環システム構築」事業を基に開始されたものである。この成果を活用し産学官の叡智を集結し、2021 年度に公募を行い、事業を開始した。

(2)実施体制及び役割分担

プロジェクトマネージャーに NEDO 環境部 主任研究員 今西大介を任命して、事業全体の企画・管理を行うとともに、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化した。また、本事業では社会実装を想定しユーザー企業の参画により、市場で求められている再生アルミニウム材の物性等の情報を共有しつつ事業を進めることとした。

3.2. 受益者負担の考え方

表 3.2 本事業の研究開発費用（百万円）

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	合計
アルミニウム素材高度 資源循環システム構築事業	300	312	260	(300)	(300)	1,472

本事業は補助率 1/2 の助成事業であり、事業期間 5 年でほぼ 15 億円の予算規模で推進しているものである。

3.3. 研究開発計画

先に述べた様に、本研究開発は 2 つの研究開発項目から構成されている。2 つの研究開発項目を推進するものであり、再生アルミニウム材の品質を維持するためのアルミニウム合金に含まれる金属不純物を低減するもの、またリサイクルアルミニウム合金に微量不純物が含まれる場合に高度な加工熱処理を行う事で不純物の影響を無害化するもので、この両技術の達成によりアルミニウムの水平リサイクルを実現するものである。

研究開発項目	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
①不純物元素低減技術 固体溶融塩電解	小規模ベンチプラントによる 運転方法確立・生産性評価	大規模ベンチプラント 設計・製作 生産速度への 各因子影響調査		大規模ベンチプラントによる 運転方法確立・生産性評価	
電磁攪拌によるα-Al相晶出量制御	ラボスケールによる条件検討 試作開発機			対象合金拡大 組成情報を元に試作	
溶解前処理によるスクラップ組成制御	走査型分光ソータ処理試験 3D位置制御システム開発	走査型分光ソータ 組み合わせ			
②微量不純物を無害化する高度加工技術等 縦型高速双ロール鋳造を用いた不純物無害化	表面品質と材料特性が優れた鋳造条件確立 長尺実験機の設計と設置		試作材供給	長尺実験機による 長時間安定操業技術確立	
加工熱処理による不純物無害化		リサイクル材を用いたHPSとARBによる 材料特性改善手法の確立		リサイクル材を用いた 高強度板材の大型化実証	
高精度成形予測技術（成形シミュレーション）		既存材を用いた多軸応力データベース構築 高精度材料モデリング手法確立		リサイクル材の高精度材料 モデリングと予測精度向上	
LCA/規格化		各プロセスに対しLCA評価、経済性評価、 再生合金の規格化に向け登録する材料選定		スケール効果を加味したLCA評価、経済性評価 再生合金の登録申請準備	

図 3.1 本研究開発の研究計画

• 研究開発体制

本事業は図 3.2 に示す実施者により構成され、UACJ を代表とする研究開発体制は、アルミニウム製造技術研究に関する世界的な第一人者である東京工業大学の熊井真次特任教授を事業者リーダーとし、研究開発を推進している。

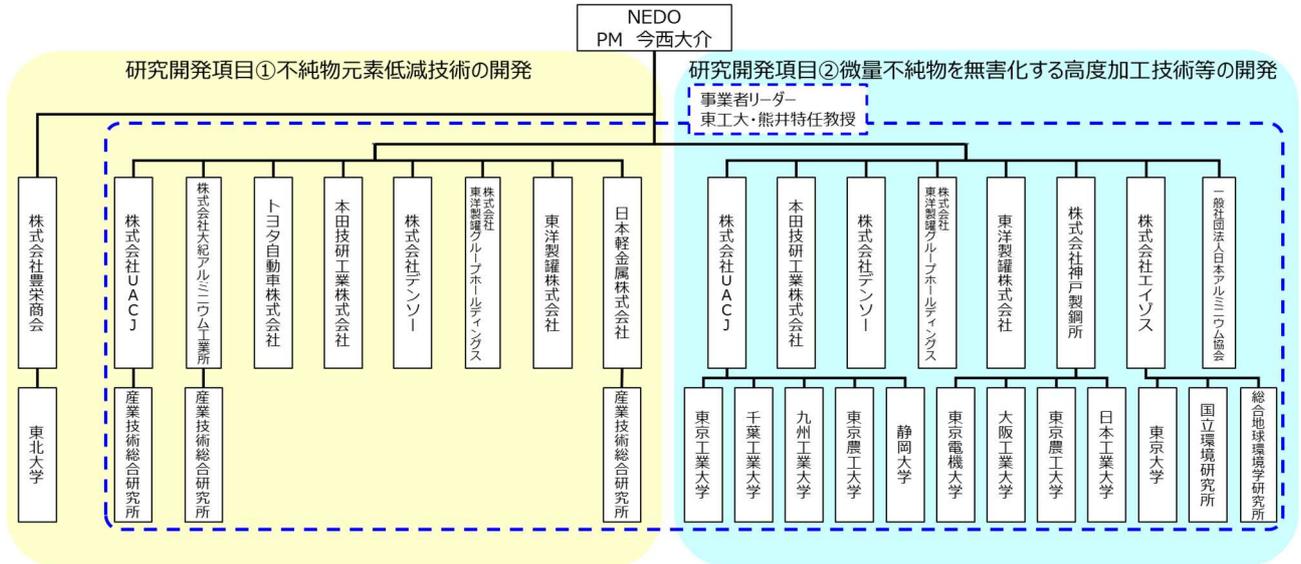


図 3.2 本事業の実施事業者詳細



## 4. 目標及び達成状況の詳細

### 4.1 研究開発項目①不純物元素低減技術の開発

#### 「溶融塩使用固体電解によるアルミ合金スクラップからの高純度アルミ精製技術の開発」

##### 実施者名、実施体制

本研究開発は、東北大学の研究シーズ（固体溶融塩電解）を、スケールアップしたベンチプラント実験で再現し、実機設計ができる運転データを得ることを目的とする。ベンチプラント実験は株式会社豊栄商会と東北大学が共同で実施し、課題解決のための基礎的検討およびアルミニウムスクラップの需給バランス解析を東北大学が実施する。実施体制は図 4-1-1 のとおりである。

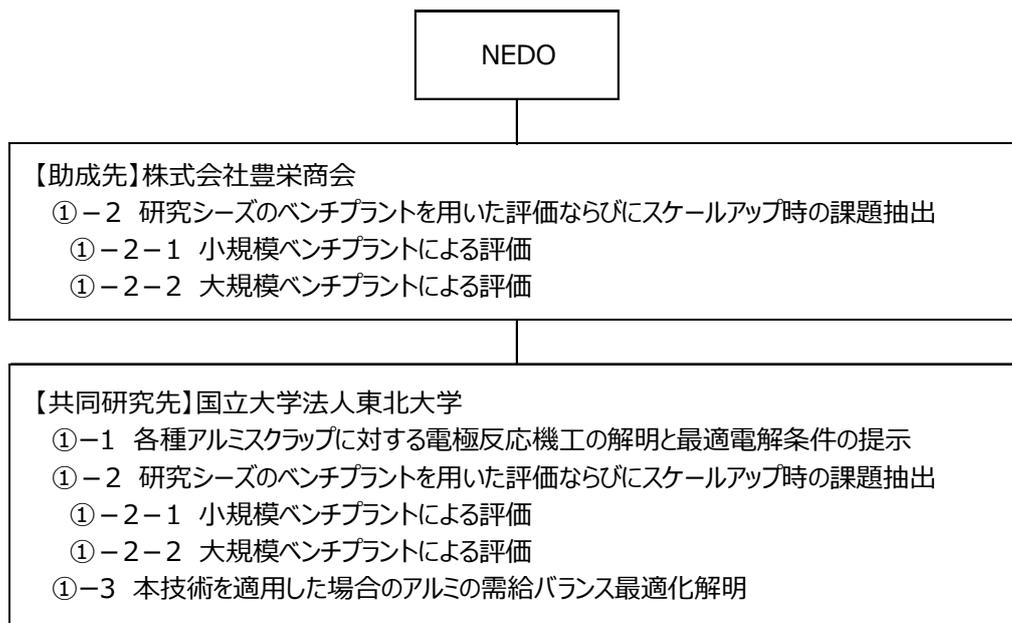


図 4-1-1 研究開発体制

##### 期間、予算

期間：2021年9月16日～2024年3月31日

予算：p3-2 参照

##### 実用化への道筋

###### (1) 研究開発を行う製品・サービス等の概要

アルミニウム新地金を代用可能な品質の再生地金を製造可能とする技術及び設備の開発と、それら商用提供を目指す。

###### ①再生高純度アルミニウムの提供

アルミニウム製品回収事業者から使用済みアルミニウム（スクラップ）を仕入れ、これを元に再生高純度アルミニウム地金を製造して圧延メーカーに供給する。

現行の技術では将来、アルミニウムスクラップ発生量は、リサイクルした後に鑄造系材料として供給可能な数量を上回ると推定されている。また、アルミニウムスクラップは再利用を重ねる中で、合金元素の蓄積が進むため商品価値は下落することになり、現状のアルミニウムリサイクルは破綻することになる。本研究開発で得られる技術は、余剰アルミニウムの再生供給量を大きく増加させることができ、高度なアルミニウムリサイクルの構築に資することができる。

②技術のライセンス／アルミニウム精錬設備の提供

開発した技術及び設備を、高純度アルミニウム地金の調達を必要とするアルミニウム圧延メーカー、アルミニウム 2 次合金メーカーに提供する。

(2) 実用化・事業化の制約

(a) 事業開始時期

事業の成立には、アルミニウム新地金とアルミニウムスクラップにある程度の価格差が必要。アルミニウムスクラップ価格の下落はスクラップ量が過剰になるタイミングから始まると想定され、この時点から事業開始が可能となる。

(b) 電力単価

本法は電力を使用するプロセスなので、電力単価が海外より高額になり過ぎると国内での実施が難しくなる。

(3) 事業化のスケジュール

表 4-1-1 に事業化までのスケジュールを示す。小規模ベンチプラントから大規模ベンチプラントへと段階的にスケールアップをしてプロセスの確立を図る。その後、アルミニウムスクラップの種類、量、価格から事業性を評価し、事業化の続行か中断の判断をする。

表 4-1-1 事業化までのスケジュール

項目	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
小規模ベンチプラントによる評価	■								
大規模ベンチプラントによる評価		■							
客先との製品仕様確認					■				
製品設計（品質・形状）					■				
調達可能スクラップの評価					■				
事業性評価					■ ◇続行/中断を判断				
設備投資					■				
生産・販売							■		

アウトプット目標の達成状況

本研究開発では、東北大学の研究シーズ（固体溶融塩電解）を、スケールアップしたベンチプラント実験で再現し、実機設計ができる運転データを得ることを目的とする。

各研究開発項目の現状の達成状況は、下記のとおりとなる。

①-1 各種アルミスクラップに対する電極反応機構の解明と最適電解条件の提示（東北大学）

5 種類の Si 濃度の異なるアルミニウムスクラップを用いた基礎実験を実施し、本技術が適用可能なアルミニウムスクラップ組成を基にした品質マップ作成に取り組む。

基礎実験の結果、Si 濃度=5~11%、Cu 濃度=0~4%の範囲では、付着 Al 中の Si 濃度は最大 0.27%であり、Si、Cu 濃度に依らないことが判明し、本技術が広範囲なアルミニウムスクラップに適用可能であることが分かった。

最適電解条件の提示に関しては溶融塩中の  $Al^{3+}$  量を上昇させることにより AI 回収率を向上させる可能性を提示した。引き続き、溶融塩中の  $Al^{3+}$  量、カソード面積、電流密度、電解時間の要因の影響の解析により最適電解条件を提示する。

## ①-2 研究シーズのベンチプラントを用いた評価ならびにスケールアップ時の課題抽出

(豊栄商会、東北大学)

### ①-2-1 小規模ベンチプラントによる評価

実機サイズの 1/10 の小規模ベンチプラントの設計・製作及び評価を実施する。小規模ベンチプラントの設計・製作を終え、電解試験を実施した。電解試験では、Si 濃度 10%以上のアルミニウムスクラップから Si 濃度 0.2%以下の電析物を得た。アルミニウム回収率に関しては、槽内の  $AlF^{3+}$  濃度を上げることで 10%未満であったものを 58.7%まで向上させることができた。更なるアルミニウム回収率の向上のために、電極板面積、電流密度、電解時間の最適組み合わせ条件を探り、これら要因の影響を調査する。

電析されたアルミニウムは殆ど不純物を含まないことを確認したが、電極からの剥離物ではアルミニウム純度が 88%程度であった。電析物に溶融塩を巻き込んだためと推定されることから溶融塩分離が課題であることを確認した。この対策として、溶融塩を含有する電析物を高温で溶解し、溶融塩とアルミニウムの比重分離を試みることにした。

### ①-2-2 大規模ベンチプラントによる評価

実機サイズの 1/5 の大規模ベンチプラント（小規模ベンチプラントの 2 倍）による評価を実施する。

現在、基本設備スペックの検討は完了。プラントの設計・製作・試運転完了後、運転方法の確立、アルミニウム生産性評価を実施する予定である。小規模ベンチプラントで探った最適組み合わせ条件をさらに拡大した実験を行う。

## ①-3 本技術を適用した場合のアルミの需給バランス最適化解析（東北大学）

### 電気自動車へのシフトに着目した輸送部門およびその他製品部門にわたる世界の AI 需要量の分析

2020 年の世界のアルミニウム新地金需要量は 7,250 万 t であったが、2040 年には 54 万 t 減少して 7,200 万 t となると推定されている。このとき、電気自動車へのシフトに伴って発生するアルミ鋳造品の余剰量は 364 万 t に達する見通しである。本技術導入により、この余剰量を新地金と同等品質にすることができるので、新地金の供給量は 6,830 万 t に減少させることが可能となる。

表 4-1-2 各研究開発項目の目標と達成状況

大分類	中分類	小分類 (要素技術)	目標と達成状況 (当初計画との差異)
①-1 各種アルミスクラップに対する電極反応機構の解明と最適電解条件の提示		再溶解アルミスクラップの組成範囲取りまとめ、本技術適用後の品質のマッピング	<b>中間目標：</b> 本技術が適用可能なアルミスクラップ組成と適用後の品質のマッピングを作成する <b>達成状況：</b> ○ 5種類のSi濃度の異なるスクラップを用いた基礎実験実施し、Si濃度=5~11%、Cu濃度=0~4%の範囲では、付着Al中のSi濃度は最大0.27%であり、電析物のアルミ純度は、Si、Cu濃度に依らないことを確認した（当初計画との差異無し）。
		最適電解条件提示	<b>中間目標：</b> 本技術の最適化された電解条件を提示する <b>達成状況：</b> ○ Si濃度：Si:10%以上の合金からSi:0.2%以下の電析物を取得した アルミ回収率：槽内のAlF <sub>3</sub> +濃度を向上させることで、10%未満であったAl回収率を58.7%まで向上させることができた（当初計画との差異なし）。
①-2 研究シーズのベンチプラントを用いた評価ならびにスケールアップ時の課題抽出	①-2-1 小規模ベンチプラントによる評価	小規模ベンチプラントの設計・製作／基礎実験結果との比較	<b>中間目標：</b> 東北大学の基礎実験結果と比較可能な小規模ベンチプラントを設計、製作し、スケールアップ時の課題を明らかにする。 <b>達成状況：</b> ○ 実機サイズ1/10の小規模ベンチプラントを設計・作製を完了した。電解試験により、ほとんど不純物を含まないアルミが電析されることを確認したが、想定より電析量が少なく、電析物に巻き込まれる溶融塩の分離・除去が必要であることを確認した（当初計画との差異なし）。
		運転方法の確立	<b>中間目標：</b> Si:5%以上のアルミスクラップを用い、Si3%以下、アルミ回収率70%以上を達成する。 <b>達成状況：</b> ○ Si濃度：Si:10%以上の合金からSi:0.2%以下の電析物を取得した。 アルミ回収率：槽内のAlF <sub>3</sub> +濃度を向上させることで、10%未満であったAl回収率を58.7%まで向上させることができた（当初計画との差異なし）。
	①-2-2 大規模ベンチプラントによる評価	実機1/5サイズ(小規模ベンチプラントの2倍)の電極面積を有する大規模ベンチプラントの設計、製作の完了ならびに試運転の開始	<b>中間目標：</b> 設計・製作・試運転を完了する。 <b>達成状況：</b> ○ 基本設備バックの検討を進めており、2023年10月にプラントを完成、試運転開始の予定（当初計画との差異なし）。
①-3 本技術を適用した場合のアルミの需給バランス最適化解析		アルミスクラップの具体的な市場推定	<b>中間目標：</b> アルミ需給バランスに及ぼす波及効果の定量的解析を実施し、世界あるいは国内において本技術が対象とするアルミスクラップ量の導出をする。 <b>達成状況：</b> ○ 全世界において2040年には電気自動車へのシフトに伴うアルミ鋳造品の余剰量は364万tに達することを把握した（当初計画との差異なし）。

## 成果の意義

本法（図 4-1-2）は、アルミニウム合金スクラップを固体のまま溶融塩に装入して電解する技術であり、合金元素の Si、Cu は溶解させずに陽極泥として分離する。現在の新地金製造法であるポーキサイトからの製造法に比べて、金属物質を出発物質とすること、電解温度が低くて済むこと等から総エネルギー消費量は少ない。

表 4-1-3 に、本法と既存方法の操業温度、エネルギー消費量、合金元素低減量の比較を示す。本法のエネルギー使用量は 58.4~79.8MJ/kg-Al（内訳を表 4-1-3 に示す）と推算され、アルミニウム新地金製造法（既存実用法である Hall-Héroult 法;162.0MJ/kg-Al）の 35~50%程度で済む。この差は電気使用量であり、CO<sub>2</sub> 削減に大きく貢献する。

本法では、世界で初めて、スクラップ中のアルミニウム以外の元素（Si、Cu、Zn、Fe、Mg、Mn 等）の殆どを除去して高純度 Al（>99%）を得ることが可能である。

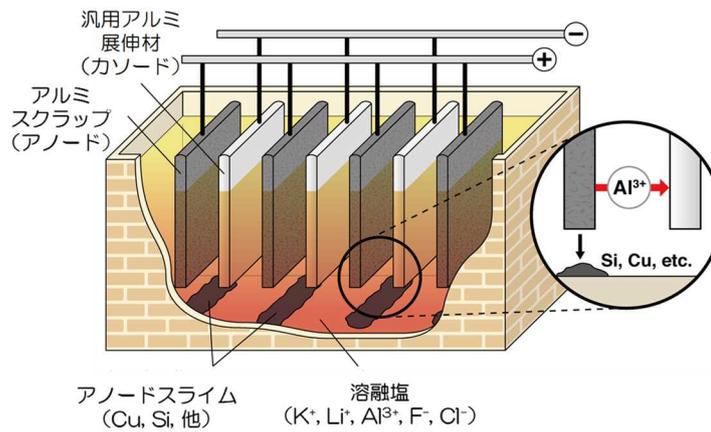


図 4-1-2 本法の概略図

表 4-1-3 本法のエネルギー消費量の内訳

項目	消費エネルギー (MJ/Kg-Al)
アノードを溶製するためのエネルギー	5.2
電解をするためのエネルギー	48.4~69.8
電解で採取された電析物を再溶解するためのエネルギー	4.8
合計	58.4~79.8

現在のアルミニウムリサイクルは、アルミニウム以外の元素含有率が高い鋳造・ダイカスト材へのカスケードリサイクルとなっており、リサイクル回数が増加するほどアルミニウム以外の元素属含有率が上がる。スクラップからアルミニウム以外の元素を除去する技術が確立されていないことから、再利用できないアルミニウムスクラップ量が必然的に増加することになる。

今後、環境問題や電気自動車の普及により、軽量化のためアルミニウム展伸材の需要は増えるが、鋳造・ダイカスト材の需要に大きな伸びはなく、再利用できないアルミニウムスクラップ量増加に拍車をかける。本技術が実用化されると、我が国のアルミニウムの循環構造が表 4-1-4 に示すように根本的に変わることが期待される。すなわち、展伸材同士の水平リサイクル、鋳造・ダイカスト材から展伸材へのアップグレードリサイクルが可能となる。

表 4-1-4 本法の実現によるアルミのリサイクル形態の変化

リサイクルパターン	現状技術での可否	現状技術に関する問題点等	本研究開発より期待される効果
W材+C材+D材⇒C材、D材	○	現状の基本的パターン。アルミホイールやエンジンプロック等、形状からおおよその組成がわかる一部のスクラップ以外は、一般的には分類せずにまとめて溶解するため、新地金で希釈する等の成分調整が必要。	—
W材⇒W材	×	展伸材は30種類以上の厳密な組成規格があるので、展伸材スクラップ同士であっても展伸材として再生することは困難。	○
W材⇒C材、D材	△	もうひとつの基本的現状パターン。一般的に鋳造材は展伸材よりCu、Siの規格濃度が遥かに高いので、Cu、Siの追加が必要。他方、展伸材は鋳造材に比べてMgが高いため、脱Mgまたは新地金による希釈等による成分調整が必要。	○
C材+D材⇒W材	×	鋳造材中に大量に含まれるCu、Si等の合金元素除去・濃度制御が必要であるため、現行技術では不可能なアップグレードリサイクル。	○
C材+D材⇒C材、D材	△	現状パターンのひとつであるが、展伸材混合による希釈効果がないと、成分調整が必要になる場合がある。エンジンプロック等の大口の鋳造材用途が減少すると、鋳造材のリサイクル需要がタイトになる。	—

※ W材：展伸材、C材：鋳造材、D材：ダイカスト材

表 4-1-5 に国内外他社における関連技術に関して述べるが、合金中元素を効率的に除去する競合技術は未だ実用化されていない。今後本プロジェクトから生まれた知財を積極的に権利化し、その使用実施権の譲渡を含めて検討する。

表 4-1-5 国内外における関連技術

		技術の内容	技術の評価	本法との比較
実用化されているアルミ合金精製技術	三層電解法	アルミ合金、熔融塩、純アルミを比重差で液体の三層構造として電解。中間層の熔融塩を介して陽極側から陰極側へアルミが移行し純アルミが得られる。	アルミ新地金をさらに精製し99.9%以上の高純度アルミを得るための方法。原理的にアルミからMg, Siを除去することは不可能。大規模に三層を維持することが難しく広い電極面積を確保できないために電力消費が非常に大きい。	アルミ合金よりMg, Si除去不可能のため現状では実現が難しい
	偏析法	アルミ合金を溶融させた後に非常に遅い冷却速度で凝固させ、合金元素の固液間の溶解度差を利用して最終凝固部へ合金元素を濃縮させる。	最終凝固部を切り離すためアルミ純度は上がるが、溶融→徐冷の操作を繰り返す必要があるため非常に効率が悪い。ダイカスト材を精製した場合、精製アルミとして回収できる量は6割以下であり、合金元素を数10%含む「使えないアルミ合金」が大量に残る。	一般的アルミ合金スクラップの精製に適用することは不可能で現状では実現が難しい
特許検索 (1件のみ)	特開昭 58-93883: 「アルミニウムの精製方法」	熔融塩電解浴を吸収した多孔質体の片側に溶融不純アルミを配置し、不純アルミを陽極、他の片側に陰極を配置して電解する。	Mg除去は可能であるが、Fe, Cu, Si, Mnは除去できない。	Fe, Cu, Si, Mnが除去できないため現状では実現が難しい
実験室規模での研究	溶融アルミ合金の精製電解	Schwarzら: J. Appl. Electrochem., 25(1995), p.34. 隔膜を用いた溶融アルミ合金の精製電解セル	工業生産に耐える適当な隔膜が未だ見つかっていない。	本法の競合技術となるためには装置が未開発
	イオン液体を用いた電解法	Kamavaramら: J. Min. Metall., 39(2003), p.43. AlCl <sub>3</sub> 系EtMeImイオン液体を用いた電解法	イオン液体は電気伝導度が本法で用いる熔融塩より2桁以上低く低温で電解できる長所はあるが、電解エネルギーは非常に大きくなる。	本法の競合技術となるためにはコスト低下策が必要

以下、具体的に関連技術に関して述べる。

(a) 実用化されているアルミ合金精製技術

① 三層電解法

アルミニウム合金、熔融塩、純アルミを比重差で液体の三層構造として電解すると、中間層の熔融塩を介して陽極側から陰極側へアルミニウムが移行し、純アルミが得られる。原理的にアルミニウムから Mg, Si を除去することはできない。

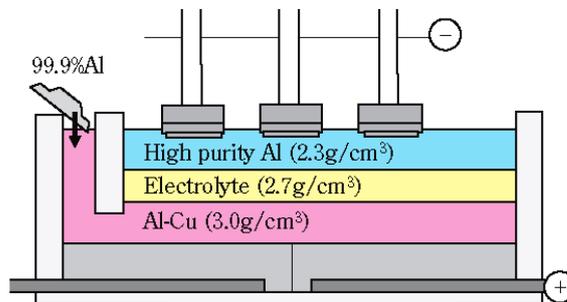


図 4-1-3 三層電解法

② 偏析法

アルミニウム合金を溶融させた後に非常に遅い冷却速度で凝固させ、合金元素の固液間の溶解度差を利用して最終凝固部へ合金元素を濃縮させる。ダイカスト材を精製した場合、精製アルミニウムとして回収できる量は 6 割以下であり、合金元素を数 10%含む「使えないアルミニウム合金」が大量に残る。一般的アルミニウム合金スクラップの精製に適用することは難しい。

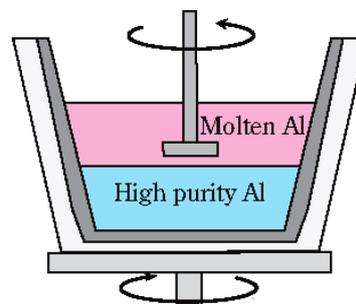


図 4-1-4 偏析法

(b) 特許検索で見出された唯一の方法:特開昭 58-93883:「アルミニウムの精製方法」

熔融塩電解浴を吸収した多孔質体の片側に熔融不純アルミニウムを配置し、不純アルミニウムを陽極、他の片側に陰極を配置して電解する。Mg 除去は可能であるが、Fe、Cu、Si、Mn はほとんど除去できない。

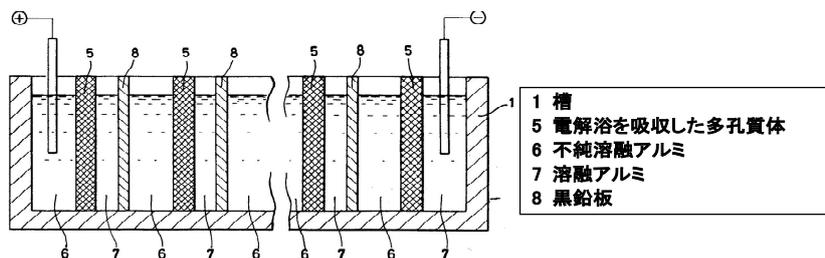


図 4-1-5 アルミニウムの精製方法

(c) 実験室規模での研究例

① 隔膜を用いた熔融アルミ合金の精製電解セル

(Schwarz ら: J. Appl. Electrochem., 25 (1995), p.34)

工業生産に耐える適当な隔膜が未だ見つからない。

② AlCl<sub>3</sub>系 EtMeIm イオン液体を用いた電解法

(Kamavaram ら: J. Min. Metall., 39 (2003), p.43)

イオン液体は電気伝導度が本法で用いる熔融塩より 2 桁以上低く低温で電解できる長所はあるが、電解エネルギーは非常に大きくなる。

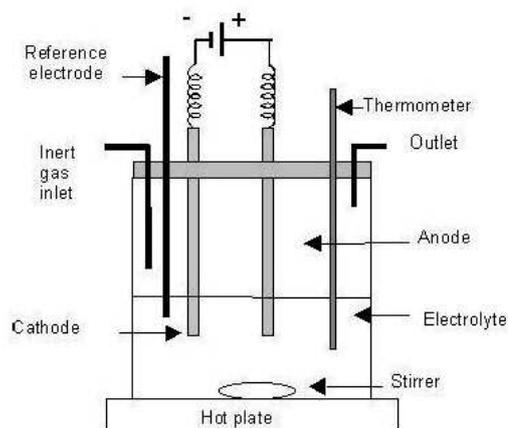


図 4-1-6 イオン液体を用いた電解法

アルミニウム資源と製錬インフラを持たない我が国にとっては、新地金輸入をしないとダウングレードであってもアルミニウムの循環利用は成立しない。本法により新たなアルミニウム精製技術が実現すれば、新地金相当の再生アルミニウム製造が可能となり、新地金の輸入量低減、海外依存率低減が図れ、我が国のアルミニウムの循環構造が変わる。

我が国は、世界の先進諸国に対して、アルミニウムのサステナビリティ分野におけるイニシアチブ獲得につながる。

また、若手研究者の参画は、アルミニウムの製造・販売・リサイクルの総合的な知見等が身に付くとともに、アノードインゴットの製造・カソードの製品化のための溶解・鋳造及び改善技術を得ることにつながり、各種のスキル向上といった副次的な効果がある。

## 特許出願件数、論文発表数

論文発表等は下表（表 4-1-6）のとおり。

表 4-1-6 特許出願件数、論文発表数

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	計
特許出願（うち外国出願）	0（0）	0（0）	0（0）	-	-	0
論文	0	1	0	-	-	1
研究発表・講演	0	0	1	-	-	1
受賞実績	0	0	0	-	-	0
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	-	-	1
展時会への出典	0	0	0	-	-	0

## 研究開発成果の詳細

### 研究開発の内容

本研究開発では、東北大学（共同研究先）における研究シーズ（予備実験結果）を実用化可能な技術として開発するため、ベンチプラントのサイズを段階的に拡大することでスケールアップ時に想定される技術課題の解決を図る。これによって、実機へのスケールアップに必要な具備すべき設備スペックを抽出し、実機における最適運転条件を導出するとともに、事業化時の採算性評価に資するデータを算出する。

そのため、同研究シーズは原理的に通常のアルミ合金に含まれる元素はすべて除去可能と考えられるが、アルミスクラップには多くの種類の元素が幅広い濃度幅で含まれるため、まずは、除去可能なアルミスクラップ組成等の範囲の確認を進める。この際、電極界面反応の解明についても検討を進め、基礎研究結果を蓄積し、ベンチプラントの運転最適化に資する電解条件の探索に取り組む。

まずは大学実験室に、人手作業が可能な最大サイズであり、実機の 1/10 サイズの電極面積を有する小規模ベンチプラントを設計・製作し、基礎実験との比較及びスケールアップ時の課題を明らかにする。さらに Si 濃度 5%以上のアルミスクラップから Si 濃度 3%以下、アルミ回収率 70%以上を得ることができる運転条件を確立する。

その後、電極板を多段に配置することでより実機に近い、実機の 1/5 サイズの電極面積を有する（小規模ベンチプラントの 2 倍）大規模ベンチプラントを設計・製作し、アルミ生産性評価及び運転条件を確立する。

さらに、世界あるいは日本におけるスクラップの需給状況を調査し、今後の自動車産業の行方をシナリオ化して、そのシナリオに基づいて、本技術が対象とするアルミスクラップ量の導出についても取り組む。

### ①- 1 各種アルミスクラップに対する電極反応機構の解明と最適電解条件の提示（東北大学）

#### 溶融塩電解の Al 合金スクラップへの適用

図 4-1-7 に示す装置を用いて電解実験を行った。実験条件としては、真ん中にアノード（Al 合金）1 枚を置き、両側にカソード（純 Al）1 枚ずつ配置し、電流密度=0.2A/cm<sup>2</sup>、電解時間=2h、電解温度=500℃として、溶融塩には LiCl-KCl 共晶組成 + AlF<sub>3</sub> を使用した。また、アノードに用いた Al 合金スクラップとして表 4-1-7 に示す化学組成の異なる 5 種類の Al 合金スクラップを用いた同一条件で実験を実施した。

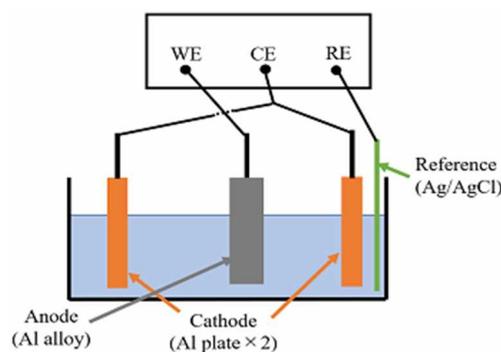


図 4-1-7 基礎実験概略図

表 4-1-7 東北大学で使用した Al 合金スクラップの化学組成 (重量%)

	Cu	Si	Fe	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Cr	Sn	Pb	Al
AC3A	0.01	10.76	0.2	0.01	0.12	0.01	0.01	0.08	0	0	0	88.8
AC2B	2.54	6.23	0.25	0.17	0.33	0.29	0	0.04	0.01	0.01	0.01	90.11
AC4C	0.02	7.08	0.15	0.06	0.31	0.01	0.01	0.12	0	0.01	0	92.21
AC2A	3.75	5.05	<0.8	<0.5	<0.2	<0.55	<0.3	<0.2	<0.1	<0.0	<0.15	90.18
ADC12	1.74	10.84	0.81	0.77	0.22	0.21	0.07	0.04	0.28	0.02	0.04	85.0

図 4-1-8 に示すように、カソードには Al が付着した。アノードとして用いた Al 合金組成 (Si, Cu) に対して、付着 Al 中の Si, Cu 濃度測定結果を図 4-1-9 に示す。Al 合金組成 (Si 濃度=5~11%、Cu 濃度=0~4%) の範囲では、付着 Al 中の Si 濃度は 0.27%以下、Cu 濃度は 0.1%以下であり、Si, Cu 濃度に抛らないことが判明した。

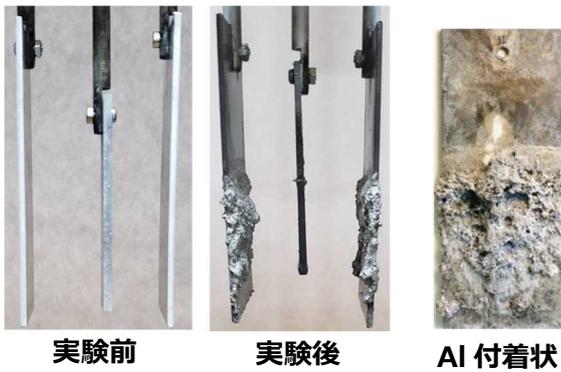


図 4-1-8 実験結果概

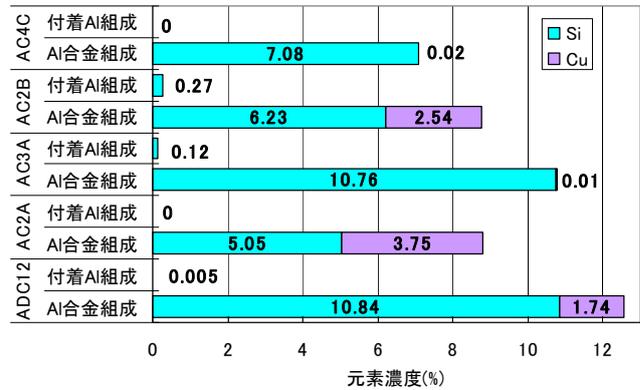


図 4-1-9 付着 Al 中 Si, Cu 濃度の測定結果

### アルミ合金主要成分の溶解挙動

リニアスリープボルタンメトリー (LSV) では、図 4-1-10 に示す装置を用いて、電極電位を一方向に連続的に変化させ、流れる電流値を測定する。電解浴として共晶 LiCl-KCl を用い、500°C で測定した結果を図 4-1-11 に示す。Al の電極電位は Fe, Cu に比べて低く (-2.35V)、Si は溶解しない。すなわち、純 Al をアノードとして電気分解する場合、Al が優先的に溶解し、Fe, Cu, Si 等の含有元素はアノードスライムとして残るといった本法の原理が確認された。

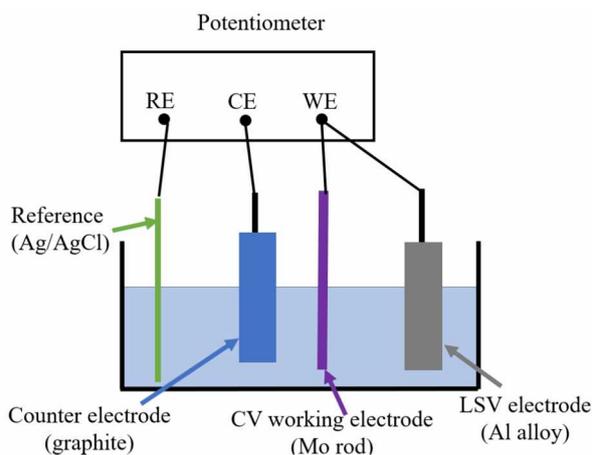


図 4-1-10 LSV 解析のための装置概略図

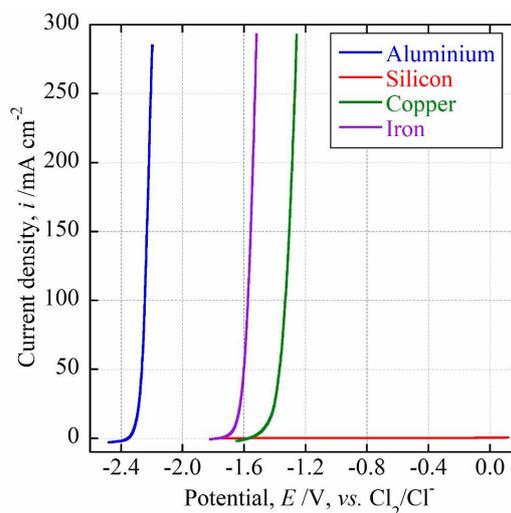


図 4-1-11 LSV 測定によるイオン酸化電位

### 電極界面反応の解析

矩形波ボルタメトリー (Square Wave Voltammetry, SWV) を利用し、合金元素である Al と Si のイオンの電気化学的挙動を調査した。電解浴として共晶 LiCl-KCl を用い、500℃で測定した。作用電極としてφ2 のガラス状炭素棒 (GC) とモリブデン丸棒 (Mo) を、対極としてφ10 のグラファイト棒を用いた。また、Al と Si のイオン源として AlCl<sub>3</sub> あるいは K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> を添加した。

0.5mol%AlCl<sub>3</sub> を添加したときの測定結果を図 4-1-12 に示す。

SWV 結果より、アルミニウムイオンの電解電位は-2.31 V であることが分かる。また 0.5mol%AlCl<sub>3</sub> を添加したときの周波数 10Hz での SWV 結果を用いて、ガウス関数に基づいたフィッティング結果を図 4-1-13 に示す。

反応電子数を求める式は下記で示される。

$$W_{1/2} = 3.52RT/nF$$

ここで、n: 反応電子数、F: ファラデー定数 (96485C)、T: 温度 (K)、R: 気体定数 (8.314J/K)、W<sub>1/2</sub>: 電位幅の半分 (V) である。

反応電子数は 3.10 と求められ、アルミニウムイオンの反応は 3 電子反応の 1 段階反応 (Al<sup>3+</sup>+3e=Al) であることが検証されたことになり、東北大学基礎実験、小規模ベンチプラントの反応解析はこの値を用いている。

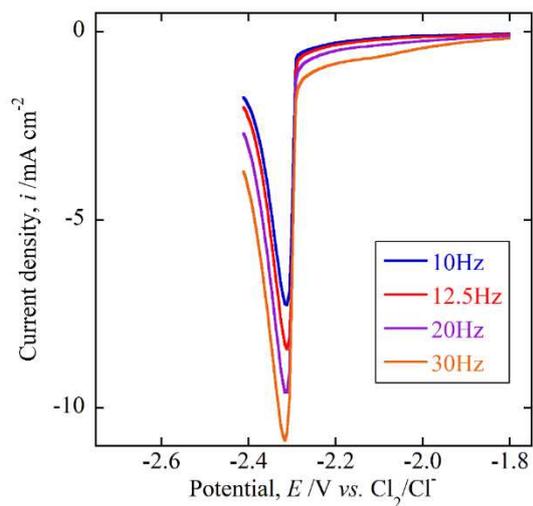


図 4-1-12 Al イオンの電極電位に及ぼす周波数の影響

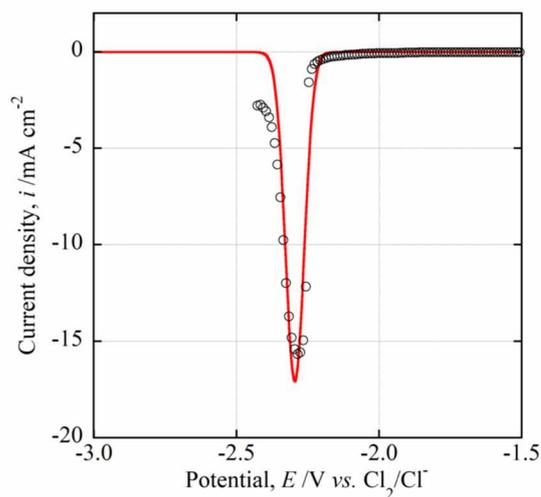


図 4-1-13 SWV 結果のフィッティング状況

同様に Si の反応電子数は 3.40 と求められ、シリコンイオンの反応は 4 電子反応であり、1 段階反応 ( $\text{Si}^{4+} + 4\text{e} = \text{Si}$ ) であることも検証されたことになる。

#### 今後の計画

今後は東北大学が実施した 5 種類の異なるスクラップを用いた基礎実験の結果を踏まえて、再溶解アルミスクリップの組成範囲をとりまとめ、本技術適用後の品質のマッピング、ならびに最適電解条件の提示に取り組む。なお最適電解条件の提示に関しては、基礎実験を基に小規模ベンチプラントで実施する溶融塩中の  $\text{Al}^{3+}$  量、カソード面積、電流密度、電解時間の要因の影響の解析により最適電解条件を提示する。

①-2 研究シーズのベンチプラントを用いた評価ならびにスケールアップ時の課題抽出 (株)豊栄商会、東北大学)

①-2-1 小規模ベンチプラによる評価

小規模ベンチプラントの設計・製作

小規模ベンチプラントでは、電極板サイズが 20cm×30cm×1cm のカソードを真ん中に 1 枚、アノードを両側に 1 枚ずつ配置した。図 4-1-14 に概略図を示す。

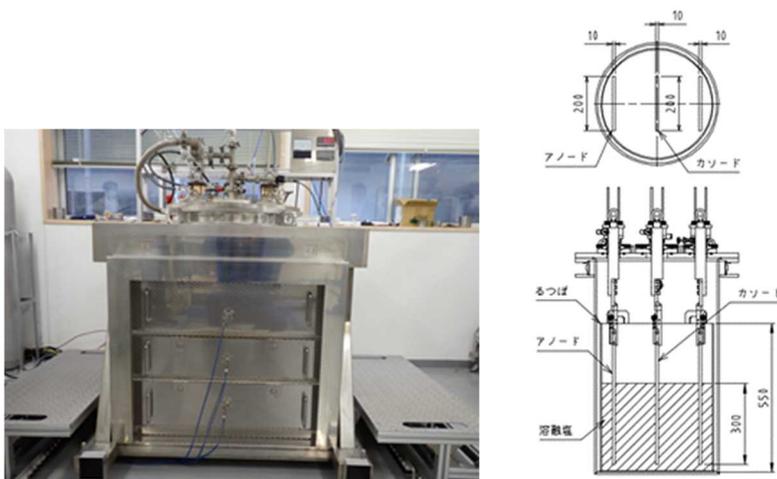


図 4-1-14 小規模ベンチプラント

基礎実験との比較

実験条件を表 4-1-8 に示す。溶融塩は基礎実験と同様の LiCl-KCl 共晶組成 + AlF<sub>3</sub> を使用した。実験条件としては、電解温度=500℃、電流密度=0.1A/cm<sup>2</sup>、電解時間=2h からスタートした。

カソード電極板の材質については、基礎実験ではアルミを使用していたが、電析物の剥がしやすさの観点から鉄からスタートをした。

表 4-1-8 実験条件

実験回数	溶融塩	溶融塩中の Al <sup>3+</sup> 量 (g)	溶融塩温度 (°C)	アノード		カソード	電流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	電解時間 (H)		
				材質	含有率 (%)					
					Al	Si			材質	
1	LiCl-KCl 共晶組成 + AlF <sub>3</sub>	2095	約500	ADC12	85.2	10.84	SPCC	0.1	2	
2							1	SPCC	0.1	5
							2	SPCC	0.1	7
3							1	展伸材	0.1	5
							2	展伸材	0.2	2

第 1 回、第 2 回実験ではカソードの材質を鉄 (SPCC 材) で実施したが、カソード板に電析物が付着しておらず回収が出来なかった (図 4-1-15)。鉄へのアルミニウムの拡散・侵入速度が遅く、境界のブリッジングが弱かったために電析物が付着できずに落下してしまうものと推定する。

そこで、基礎実験と同様に第 3 回実験ではカソードにアルミ (展伸材) を使用した。電解後のカソードを図 4-1-16 に示す。少量ではあるが電析物の付着が確認できた。

実験結果一覧を表 4-1-9 に示す。第 3 回実験結果で採取した電析物の Si 濃度は 0.13%であったが、溶融塩の巻き込みもあり、水洗いをした後もアルミ純度は 88%程度に留まった。Al 回収率も 1.5%、11.3%とかなり低い結果となった。カソード材質を変更したがそれほど Al 回収率が上がらず、材質以外にも原因があることが判った。



図 4-1-15 電解後カソード表面 (SPCC 材)



図 4-1-16 電解後カソード表面 (アルミ展伸材)

表 4-1-9 実験結果一覧

実験回数	カソード電析物												
	重量 (g)	電析物水洗後										Al含有量 (g)	Al回収率 (%)
		重量 (g)	含有率(%)										
			Al	Si	Cu	K	Li	Cl	F				
1	カソード電極板に電析物付着しておらず回収不可												
2	1	カソード電極板に電析物付着しておらず回収不可											
	2	カソード電極板に電析物付着しておらず回収不可											
3	1	133	13.7	88.0	0.11	0.15	0.88	1.01	2.64	7.18	12.1	11.3	
	2	30	2.1	82.7	0.13	0.14	1.8	1.54	4.04	8.83	1.7	1.5	

### 運転方法の検討

Al 回収率向上を目的とした実験を実施した。実験条件を表 4-1-10 に示す。

Al 回収率が著しく低い理由としては、①小規模実験では基礎実験に比べて取扱う塩化物が顕著に多く水分除去が容易でない、②溶融塩中の  $Al^{3+}$  イオンと水分が反応して固体のフッ化酸化物等を形成し、塩化物中で沈降し炉底に溜まり、溶融塩中の  $Al^{3+}$  濃度が下がってしまった等が推測される。

よって有効な  $Al^{3+}$  濃度にするために溶融塩に  $AlF_3$  を投入して  $Al^{3+}$  量を段階的に増やした。

表 4-1-10 実験条件

実験回数	溶融塩	溶融塩中の $Al^{3+}$ 量 (g)	溶融塩温度 (°C)	アノード		カソード材質	電流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	電解時間 (H)	
				材質	含有率 (%)				
					Al				Si
4	LiCl-KCl共晶組成 + $AlF_3$	4017	約500	ADC12	85.2	10.84	展伸材	0.2	7
5		5045						0.2	12
		0.25						12	

実験結果一覧を表 4-1-11 に示す。溶融塩中の  $Al^{3+}$  濃度を段階的に上昇させたところ、Al 回収率もそれに伴って向上する結果となった。電析物中の Si 濃度は 0.18% と溶融塩中の  $Al^{3+}$  濃度を増やしたことによる影響はなく、かなり低い水準であった。

以上の結果から、水分の影響により溶融塩中の  $Al^{3+}$  イオン量が少なくなり、電析しにくい状況になっていたと考えられる。塩化物は吸湿性が高いため、吸湿防止及び水分除去の対策が必要なので、吸湿防止としては塩化物の保管に湿気を極力除去した雰囲気、例えば真空中で保管する。また水分除去として溶解前の事前乾燥を十分に行う等の対策を実施する。

表 4-1-11 実験結果一覧

実験回数	カソード電析物												
	重量 (g)	電析物水洗後										Al含有量 (g)	Al回収率 (%)
		重量 (g)	含有率(%)										
			Al	Si	Cu	K	Li	Cl	F				
4	249	54.5	87.2	0.13	<0.01	1.82	2.98	4.16	3.00	48	26.7		
5	1	682	214.8	88.2	0.12	0.01	3.06	1.1	4.56	1.50	189	58.7	
	2	563	157.6	88.0	0.18	0.05	2.18	3.08	4.00	1.70	139	56.1	

### 今後の計画

今後の計画として、アルミ回収率向上のために、電極面積、電流密度、電解時間、溶融塩中の  $Al^{3+}$  濃度を変化させて、これらの要因の影響を調査する。なお、カソード付着物から溶融塩を分離除去する必要もある。まずはその方策の一つとして塩化物混じりの電析物を高温で溶解して塩とアルミを分離除去する。

また、これら LiCl 系溶融塩を用いた実験に引き続き、新たに  $MgCl_2$  系溶融塩を用いた実験を開始し、両溶融塩の実験結果の比較も含めて、小規模ベンチプラント実験における事業目標達成に向けて開発を継続する。

### ①-2-2 大規模ベンチプラントによる評価

実機プラントの装置構造は電極板の多段配置と考えており、Al 生産性向上は電極板の設置枚数増加により対処できる。小規模ベンチプラントの装置構造も当初計画では多段配置を予定していたが、東北大学基礎実験結果を再現しスケールアップ時の課題抽出を図るためには、図 4-1-14 に示すようにカソードを真ん中に 1 枚、アノードを両側に 1 枚ずつ配置する最少配置の方が、効率的実験ができると判断して計画を変更した。従って大規模ベンチプラントでは実機を想定した多段配置とする。

電解槽を角型、電極板を（陽極板 3 枚+陰極板 2 枚）とし、実機で多段設置する陽極板、陰極板の最少配置とする。生産速度を上昇させるためには、真中に 1 セット（陽極板 1 枚+陰極板 1 枚）ずつ追加するという方法を採用（図 4-1-17）。

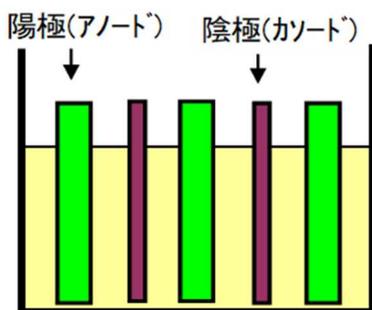


図 4-1-17 大規模ベンチプラント基本構造

現在基本設備スペック検討を完了した。設計・製作・試運転完了後、運転方法の確立、アルミ生産性評価を実施するが、小規模ベンチプラントで課題となっているカソード面積、電流密度、電解時間の3要因の単独の影響、組合せの影響の検討は、実機プラントを想定して大規模ベンチプラントでも実験を行う。

### ①-3 本技術を適用した場合のアルミの需給バランス最適化解析（東北大学）

#### (a) 東北大学の検討結果

現状では、新地金を輸入してアルミスクラップのダウングレードリサイクルを行っている我が国が、新地金を輸入することなくアップグレードリサイクルを目指すためには、海外におけるアルミニウムのマテリアルフローならびに電気自動車へのシフトによって利用不能となった鋳造スクラップの発生状況等の分析が必要である。特に世界のアルミニウム需要の半分以上を占める中国及び全世界のアルミニウムマテリアルフローをマクロ的に把握することは極めて重要である。

最終的には、海外で発生する利用不可能な鋳造スクラップの数量と取引価格ならびに国内のアルミニウムマテリアルフローから国内でのアップグレードリサイクル事業の評価を行う。

#### 電気自動車へのシフトに着目した輸送部門およびその他製品部門にわたる世界の AI 需要量の分析

本技術の導入によるアルミニウム需給バランスの最適化に向けて、全世界のアルミニウム産業に与えるインパクトという観点から、世界で進む電気自動車へのシフトに着目し、輸送部門から容器包装、機械設備、土木建築、電子機器、耐久消費財、その他製品部門にわたる世界のアルミニウム需要量を分析し、需給バランスの最適解を求めた。

分析に際し、世界における一定期間内の物質の流れを系統的にかつ定量的に示すマテリアルフロー分析を用いて、国際アルミニウム協会の「アルミニウム統計」、国際エネルギー機関の「世界の電気自動車の見通し」報告書、既存研究を基に、現行の再溶融プロセスによるアルミニウムリサイクルの下で、ガソリン自動車中心の世界の自動車産業構造におけるアルミニウム需給シナリオ 2020 および電気自動車の普及が進んだときのアルミニウム需給シナリオ 2040、本技術（固体溶融塩電解）導入時のアルミニウム需給シナリオ 2040 SSE を設定した。

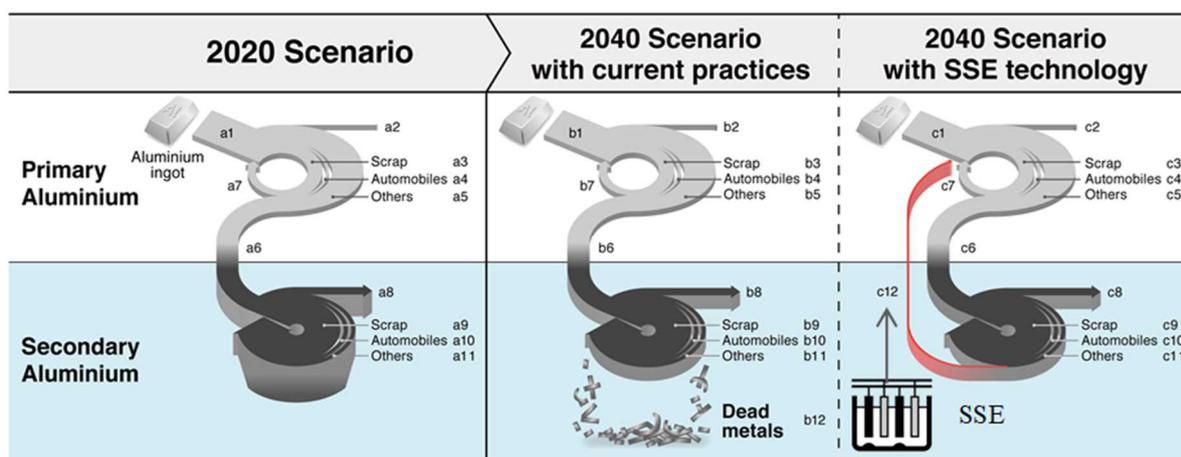


図 4-1-18 現行のアルミスクラップリサイクルを踏まえた 2020 年と 2040 年の世界のアルミニウム需給状況および固体アルミニウム電解精製技術を用いた場合の世界的アルミニウム予測

図 4-1-18 において、円の直径は AI の総流量、円の高さは AI 蓄積量を表す（数字は表 4-1-10 参照）。

図 4-1-18 に示すように、2020 年に世界のアルミニウム新地金の需要量は 7250 万 t (a1) であるが、2040 年には 54 万 t 減少して 7200 万 t (b1) となる。このとき、電気自動車へのシフトに伴うアルミ鋳造品の余剰量は

364 万 t に達する (b12) 。本技術を導入することにより、この余剰量を新地金と同等の品質に戻すことができるので、新地金の需要量は 6830 万 t (C1) に減少させることができることがわかった。

なお、本成果の基礎的な部分はシナリオに基づいた 2020 年および 2040 年のアルミのマクロ的な需要バランスであり(Lu ら:Nature,606(2022) ,p511)、それを具体的な各部門の数字として詳細に検討した結果が今回の成果である(表 4-1-12)。

表 4-1-12 図 4-1-18 に示す英数字 (単位 : 百万 t)

定義	2020 シナリオ		2040 シナリオ		SSE 技術を導入した 2040 シナリオ	
	英数字	物量	英数字	物量	英数字	物量
アルミ新地金の投入量	a1	72.5	b1	72.0	c1	68.3
ロス	a2	0.26	b2	0.25	c2	0.25
アルミ鍛造品スクラップ	a3	27.6	b3	28.2	c3	28.2
自動車用アルミ鍛造品	a4	5.5	b4	6.1	c4	6.1
その他製品用アルミ鍛造品	a5	57.7	b5	57.7	c5	57.7
廃棄されたアルミ鍛造品	a6	40.5	b6	40.9	c6	40.9
回収したアルミ回転くず	a7	14.9	b7	15.4	c7	15.4
ロス	a8	18.7	b8	18.8	c8	18.8
アルミ鋳造品スクラップ	a9	66.3	b9	64.6	c9	64.6
自動車用アルミ鋳造品	a10	8.1	b10	7.6	c10	7.6
その他製品用アルミ鋳造品	a11	8.1	b11	8.1	c11	8.1
b12 : 電気自動車へのシフトに伴うアルミ鋳造品の余剰。 c12 : SSE 技術を用いて再生された純アルミ			b12	3.6	c12	3.6

## 今後の計画

日本のアルミスクラップ量の導出についての分析をし、国内のアップグレードリサイクル事業の評価を行う。

世界で発生した利用不可能な鋳造スクラップ(価格と量)が決まったときに、国内の利用不可能な鋳造スクラップ量、自動車用アルミ鍛造品必要量等の算出を行い、コストを加味したアップグレードリサイクル事業の成立可否を提示する。

## 4.2 研究開発項目①、②

### 「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」概要

研究開発項目①と②はアルミニウム資源のアップグレードリサイクルを実現するために連携し、支援する関係にある。この関係を図 4.2 に示す。

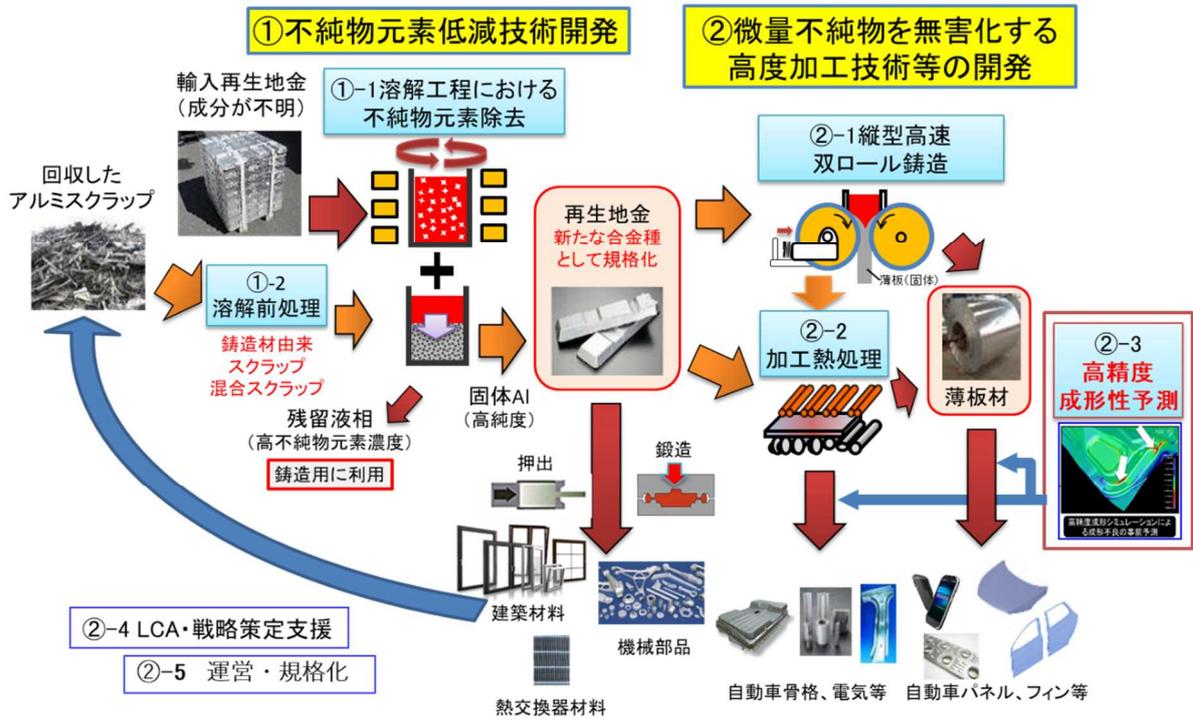


図 4.2 研究開発項目①と②の連携、支援関係図

#### ① 不純物元素低減技術開発

スクラップから再生展伸材の原料として使用可能な地金を製造できる不純物元素低減技術（溶解技術）を開発するものであり、次の①-1 と①-2 で構成されている。

①-1 溶解技術は、高度化した分別結晶法（流動付与）により高純度固体を高い収率で回収し、再生展伸材用原料として使用可能な新たな合金（再生地金）を製造するものである。①-2 溶解前処理は、固相選別によりスクラップ組成を制御し、①-1 で開発する溶解技術に適したスクラップの安定供給を図ることを目的としている。

#### ② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

本研究開発は、開発する高度加工技術によって微量不純物を無害化することにより、①-1 で開発された再生地金を原料として、既存の新地金を原料とする展伸材と同等の特性を有する再生展伸材を製造することを目的としている。併せて開発した再生展伸材が多くの製品に使用され、アルミニウムの製造時、使用時の GHG 排出量の大幅削減に貢献できるようにするため、各種支援技術開発や戦略策定を実施する。

本技術開発は、次の②-1～②-5 で構成されている。

②-1 縦型高速双ロール casting を用いた不純物無害化技術では、①-1 で製造される再生地金として想定される微量不純物含有合金を原料として、急冷能に優れた縦型高速双ロール casting 法により不純物の悪影響を低減し、再生展伸材の出発材となる成形性に富む薄板材を製造する技術を開発する。

②-2 加工熱処理による不純物無害化技術では、①-1 の再生地金や②-1 の縦型高速双ロール鋳造で製造した薄板を巨大ひずみ加工することにより高強度の再生展伸材を製造する技術を開発する。

②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術では、計算科学を活用し、②-1 や②-2 で製造される展伸材の機械的特性を予測、成形性向上のための組織制御、加工プロセスへフィードバックすることによって、再生展伸材開発を支援する。

②-4 LCA・戦略策定支援では、①-1、①-2、②-1、②-2 の各開発技術の LCA 解析や操業条件と特性に関する AI 解析等を実施し、循環プロセスが有効に機能するための方策を検討して、将来の実用化に向けての戦略策定を支援する。

②-5 運営・規格では、研究開発推進委員会等の運営、知財関係の情報管理を担当し、研究開発項目①、②全体を通して再生地金・再生展伸材の国内・国際規格化を推進する。

#### 4.3 研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

##### 「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

#### 実施者名、実施体制

本事業においては、図 3.2 (p3-3) に示す NEDO 環境部が全体をマネジメントする体制の中、「研究開発項目①不純物元素低減術開発」に示す研究開発体制で実施している。研究開発項目①は、①-1 溶解工程における不純物元素除去技術 ①-2 溶解前処理によるスクラップ組成制御技術の 2 テーマからなっており、図 4.3.1 にそれらの研究体制を示す。

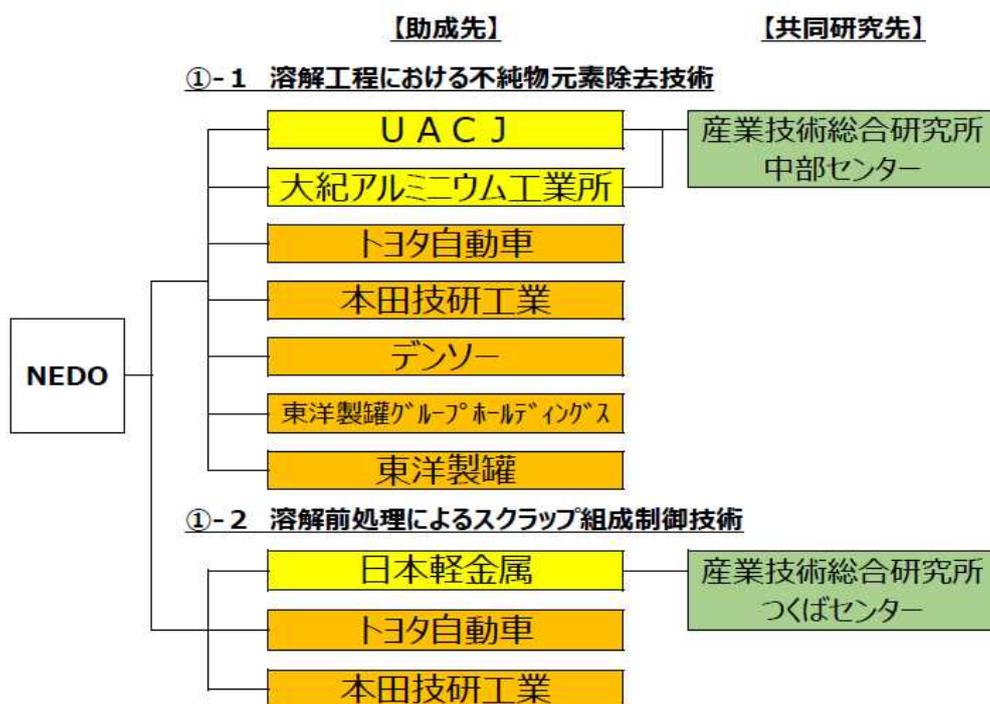


図 4.3.1 研究開発項目①「不純物元素低減術開発」の研究開発項目詳細

#### 期間、予算

期間：2021年8月30日～2024年3月31日

予算：p3-2 参照

#### 実用化への道筋

本件は研究開発項目② 不純物元素無害化技術の開発 (p4-38) にまとめて示す。

## アウトプット目標の達成状況

本研究開発項目では、溶融プロセスを中心に資源循環の阻害要因となる不純物元素を低減する技術を開発し、展伸材として利用可能な再生アルミニウム合金の製造を可能とすることを目的としている。NEDO 基本計画では中間目標を Si5%以上のアルミニウムスクラップから Si3%以下のアルミニウムを回収、収率 70%以上としているが、現状発生するスクラップの状況から、自主的な中間目標として、Si7%程度のスクラップ模擬材から Si3%以下のアルミニウムを回収、収率 60%と、技術的に難易度の高い設定としている。最終目標としては NEDO 基本計画と同様の Si7%程度のスクラップ模擬材から Si3%以下のアルミニウムを回収、収率 70%の達成を掲げている。Si は casting material 由来のスクラップに多く含まれており、現状の自動車由来のスクラップでは 7%程度となっている。一方、本事業の前身となる先導研究において、後工程の不純物無害化技術と組み合わせることにより Si3%程度まで除去することができれば、展伸材としての用途に用いることができる見込みがある。これに加え、収率を 60%程度とすることができれば実用化に向けコスト面でも優位性が見込まれることから、このような目標設定としている

本研究開発項目には 3 つのサブテーマがあり、①-1-1 では電磁攪拌による流動付与技術により固液共存状態における純度の高い $\alpha$ -Al 相の晶出量を制御する技術を、①-1-2 では晶出した $\alpha$ -Al 相の分離回収技術を開発している。また、①-2 では溶解前の固相状態でのスクラップ選別技術開発により①-1 における不純物元素低減が容易な組成に制御する開発を行っている。①-1 と①-2 の技術を組み合わせることにより、今後発生する多様な種類のスクラップを再生可能とする。

現状の達成状況としては、①-1 においてはラボレベルによる試験において中間目標である Si7%程度のスクラップ模擬材から Si3%以下のアルミニウムを回収、収率 60%は概ね達成できている。また、NEDO 基本計画の中間目標である Si5%程度のスクラップ模擬材から Si3%以下のアルミニウムを回収、収率 70%は達成している。一方、①-1-1 においては半導体不足の影響があり電磁攪拌装置用の電源に納入遅れが発生しており、テストプラントの構築が予定より遅れているものの、①-1-2 に関わる溶解炉、プレス機などは導入済みであり、電磁攪拌を加えない条件での実験を先行して行う予定である。①-2 においては現行機で元素毎の精度検証と市中スクラップの選別検証を完了し、新規開発機ではレーザー照射好適域を出力する AI の開発を完了し、スクラップを静置した状態での LIBS 分析が可能となっており、計画通り今年度で開発が完了する予定である。

表 4.3.1 研究開発項目①-1 アウトプット達成状況

大分類	中分類	小分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
①-1 溶解技術による不純物元素低減技術	①-1-1 電磁攪拌を用いた流動付与による $\alpha$ -Al 相晶出量制御技術の開発	ラボレベルにおける $\alpha$ -Al 相晶出量制御の最適化	中間目標： Si7%程度のスクラップ模擬材から Si3%以下のアルミニウムを回収、収率 60%するための電磁攪拌付与条件を調査する。実際のスクラップへの適用を考慮し基本計画に比べ高い目標を設定。 達成状況：○ 100g 程度のラボレベル試験にて 7%Si から 3%程度への純化を確認。計画どおり 2023 年 6 月に中間目標達成見込み（当初計画との差異なし）。
		テストプラントを用いた $\alpha$ -Al 相晶出量制御技術の実証	中間目標： テストプラントを導入し、 $\alpha$ -Al 相制御技術を確立する。 達成状況：○ 電磁攪拌装置、および溶湯の取り回しを含めた設備全般の設計を完了。半導体不足の影響により装置の導入が遅れているが、2023 年 12 月に達成見込み（当初計画との差異なし）。

①-1-2 α-Al 相の分離回収技術の開発	ラボレベルにおけるα-Al 相分離技術の確立	中間目標： Si7%程度のスクラップ模擬材から Si3%以下のアルミニウムを回収、 収率 60% 達成状況：○ 100g 程度のラボレベル試験にて 7%Si から 3%程度への純化、 収率 60%以上を確認。計画どおり 2023 年 6 月に中間目標達成見 込み（当初計画との差異なし）。
	テストプラントによるα-Al 相分離技術の実証	中間目標： テストプラントを導入し、α-Al 相の分離によるアルミニウムの純化を確 認する。 達成状況：○ 溶湯の取り回しを含めた設備全般の設計を完了、溶解炉・プレス機を 導入。電磁攪拌装置の納入遅れはあるが、2023 年 12 月に達成 見込み（当初計画との差異なし）。
	スクラップ組成調査と実証対象とする組成の決定	中間目標： 今後のアルミニウム需要の変化を想定し、不純物除去が必要となる組 成の調査、対象とする合金系を決定する。 達成状況：○ 今後必要となる技術として、低 Si 材料や ADC12 などのモデル材料 を決定、一部に対してはラボレベルの試験を実施しており、計画どおり 2023 年 6 月に中間目標達成見込み（当初計画との差異なし）。 低 Si 材などはラボレベルで試験を実施。
①-2 溶解前処理によるスクラップ組成制御技術の開発	走査型分光ソータによる大量処理の制御限界ならびに使用コスト把握	中間目標： LIBS の分析精度とコストの限界検証完了。 達成状況：○ 各元素の分析精度を検証完了。今後、表面状態、形状の影響を調 査し、精度、処理効率を検証することにより、計画通り 2024 年 3 月 に中間目標達成見込み（当初計画との差異なし）。
	走査型分光ソータ用制御システム開発	中間目標： 2D/3D 併用走査型 LIBS ソータの試作完了。 達成状況：○ 2D/3D データ解析システム、レーザー集光ポイント自立制御システム を開発し、スペクトル解析方法を確立することにより、計画通り 2024 年 3 月達成見込み（当初計画との差異なし）。

## 成果の意義

本件は研究開発項目② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発（p4-42）にまとめて示す。

## 研究開発成果の詳細

### ①-1 溶解技術による不純物元素低減技術

#### 研究開発の内容

本事業の前身である先導研究において、分別結晶法による不純物元素低減技術の適用範囲拡大を目的とし、鑄造材を含むアルミニウムスクラップを模擬した組成のアルミニウム合金に対し電磁力による流動を付与、α-Al 相粒子の晶出量が増加することを明らかとした。一方、先導研究では 100g 程度の合金に対する試験であり、実用化に向けては大型化を進める必要がある。このため、実用化に向け最大 10kg 程度の溶湯を対象としたテストプラントを製作し、大型化に向けた課題抽出を行う。たとえば、電磁攪拌の径方向を大型化する場合、攪拌の回転数が一定であれば外周側と内周側での流速差が大きくなる。このため、流動の効果を最大化するため、一定間隔で回転方向を反転するなど、条件の最適化が必要になると考えられる。

対象とするスクラップ組成については、当初は先導研究から引き続き、現在再生材が利用されている鑄造用合金 AC4C（7%Si）および将来展伸材由来のスクラップが増えることを想定した Al-5%Si 材料を用いる。一方、実用化に向けユーザー企業と協力し将来発生するスクラップの評価を行い、その結果に応じて本技術の適用範囲を広げるほか、後述の溶解前処理工程と組み合わせることにより実用化に向けた技術の安定性を確保する。特に、低 Si のスク

ラップが一定量得られる場合を想定し、熱交換器材料、缶用材料など、より高純度のアルミニウムが必要とされる領域へリサイクルする技術についても検討を行う。

晶出した高純度の $\alpha$ -Al 相粒子を分離する方法としては圧搾による方法を試みる。固液共存状態のアルミニウム（スラリー）に適したフィルター形状、材質の選定や圧下力の最適化、温度変化の管理などを検討し、大型化した際においても適切に分離できる技術を開発する。大型化に向け、10kg 程度の溶湯を用いたテストプラントにおいて検証を行うと同時に、抽出した課題を解決するため、先導研究に引き続き小型装置を用いた試験を行う。晶出した $\alpha$ -Al 相粒子と液相をそれぞれ分離・回収することにより、高純度の $\alpha$ -Al 相粒子は展伸材用途へ、液相は Si 量が casting 材、特にダイカスト用合金に近い組成となるため、ダイカスト用合金として再生することができる。

各社の分担としては以下の通りである。UACJ では大型化に向けた研究を行う。産業技術総合研究所との共同研究としてテストプラントの設備設計および実験の進捗に応じた改良を行う。また、過去のプロジェクト経験に基づき溶解炉、圧搾装置などを導入する。産業技術総合研究所ではこれまでの研究結果に基づき基本仕様の提示と設備の設計指針を示すほか、産業技術総合研究所の技術シーズである電磁攪拌装置を導入する。また、圧搾技術に関してプレス機などの装置を導入する。

大紀アルミニウム工業所ではテストプラントの操業条件の最適化に向けた研究を行う。産業技術総合研究所では共同研究として、ラボレベルにおける実験を実施、温度制御や圧搾条件などの条件最適化を行い、大型化に向けフィードバックを行う。また、研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発と連携し、本技術によって作製した再生地金の最終的な Si ほか不純物元素量が適切な値となるよう、制御する技術を開発する。

トヨタ自動車、デンソー、本田技研工業、東洋製罐 GHD、東洋製罐と協力し、ユーザー企業各社の基準に基づき耐食性や塗装性といった特性を評価する。純度に応じて押出成形（デンソー）や鍛造（トヨタ自動車）などへの適用可能性についても検討を行う。

### 大型化に向けた装置導入

これまでに 100g 程度の溶湯量の試料に対しては電磁攪拌による  $\alpha$ -Al 相晶出量の増加、および晶出した  $\alpha$ -Al 相分離の可能性があることが示されていた。一方、実用化に向けては大型化を進める必要がある。このため、実用化に向け、大型化における課題抽出を行うため最大 10kg 程度の溶湯を対象としたテストプラントの製作を進めている。大型化に向けたプロセスの概要を図 4.3.2 に示す。

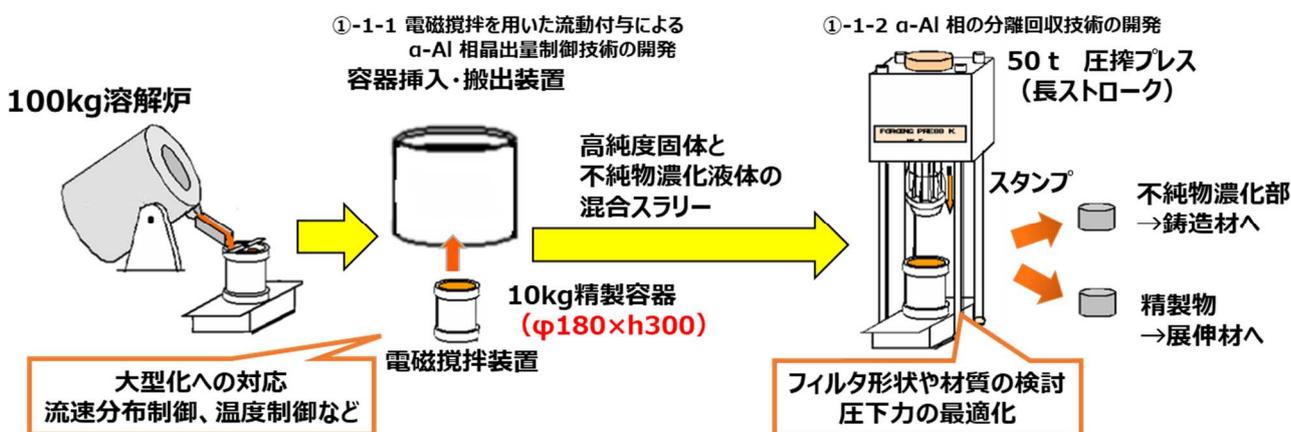


図 4.3.2 大型化に向けたプロセスの概要

主な導入予定の装置としては、100kg 溶解炉、電磁攪拌装置および圧搾プレスがある。また、これらの装置に対し溶融したアルミニウムスクラップの溶湯を適切に運搬、処理するための取り回しを検討する必要がある。これに対して、溶湯の取り回しを考慮した上での装置のレイアウトを図 4.3.3 のように決定した。溶湯の入ったコンテナは台車を用いて運搬することとした。各装置内へ移設する際、位置合わせを容易に行うため、台車を固定するためのストッパーを床面に設置することとした。

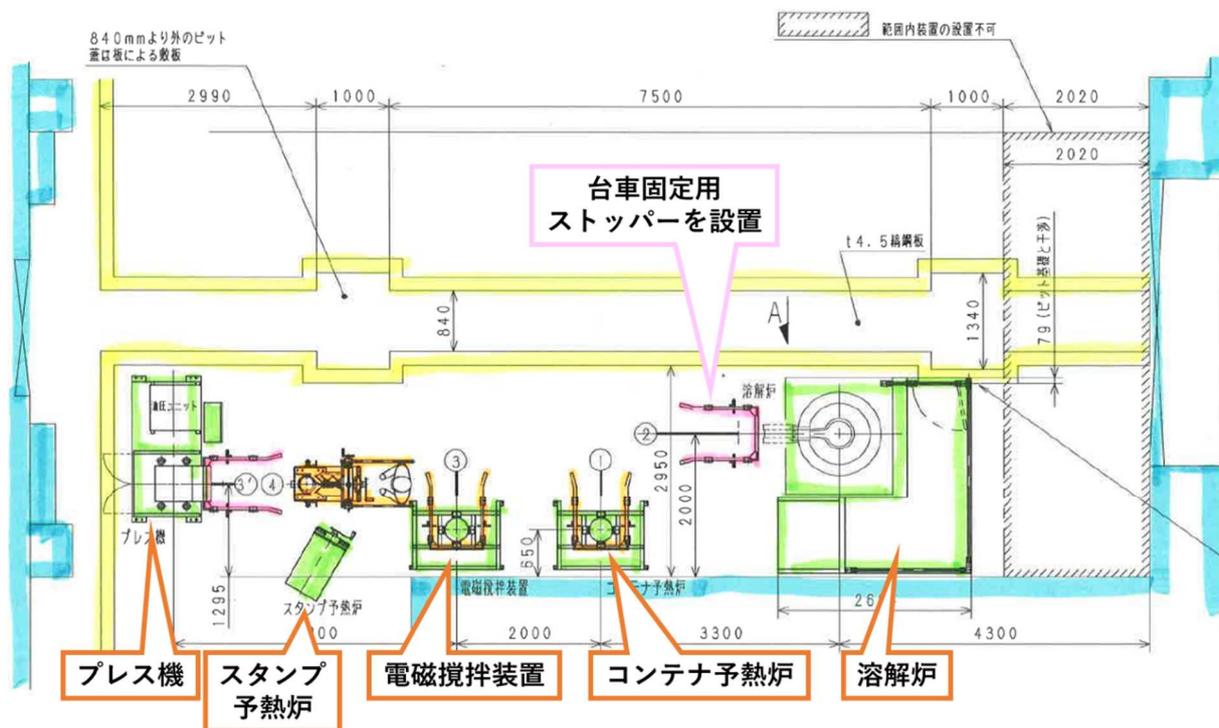


図 4.3.3 テストプラント装置レイアウト

装置に関しては溶解炉、プレス機は 2023 年 3 月半ばに納入済み、コンテナ予熱炉やスタンプ予熱炉、溶湯コンテナ搬送用の台車等もすでに納入済みである。一方、電磁攪拌装置はコイルに関しては納入済みであるものの、半導体不足の影響により駆動用インバータが長納期化しており、納期は 2023 年 9 月頃となる見込みである。現時点では溶湯の取り回しを確認した上で位置合わせ、レイアウトの最終決定を完了しており、電磁攪拌を付与しない場合の実験を実施している。大型化に向けた導入装置を図 4.3.4 に示す。

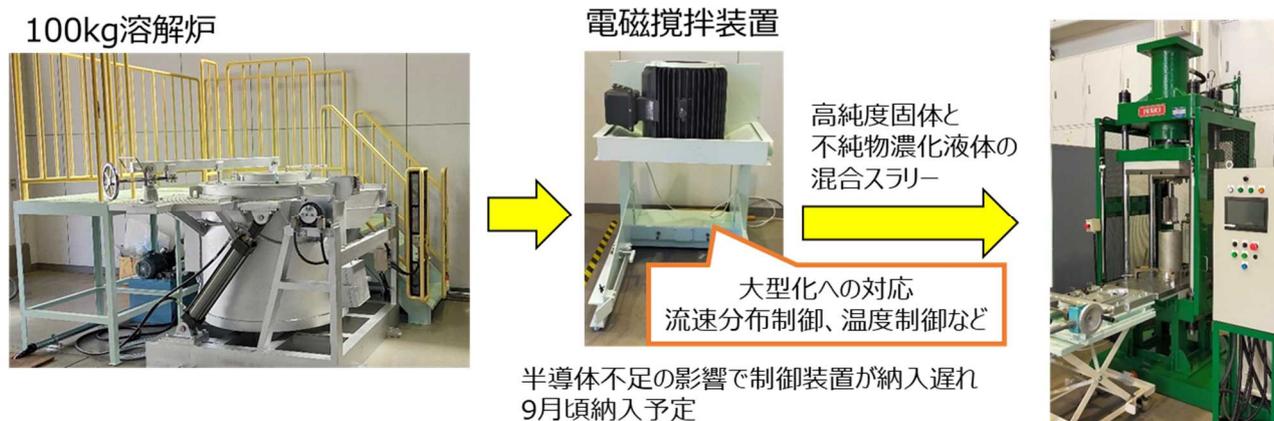
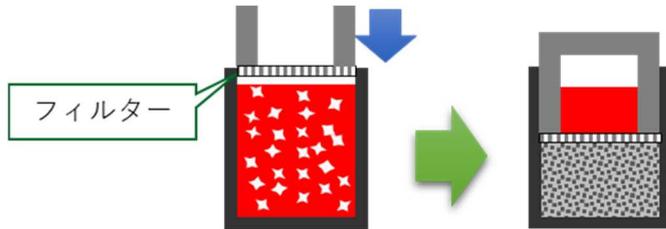


図 4.3.4 大型化に向けた導入装置

### ラボレベル試験での条件最適化

除去効率の最適化に向け、100g 程度のラボレベル試験において分離条件の検討を行った。電磁攪拌条件は先導研究において最も $\alpha$ -Al 相の晶出量が多かった 160Hz、交互攪拌の条件で付与した。また、圧搾はハンドプレスを用い、 $\phi$ 1mm のパンチングシートを用いて分離を試みた。分離前後の組織写真を図 4.3.5 に示す。



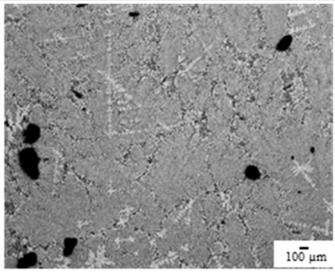
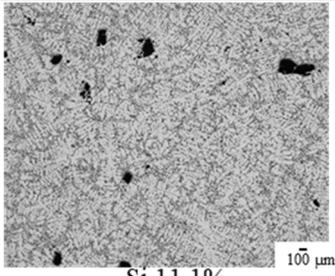
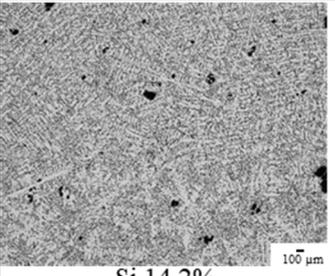
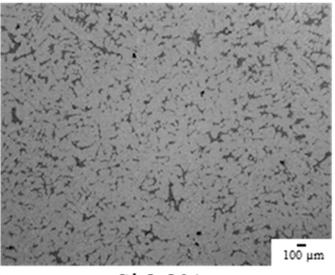
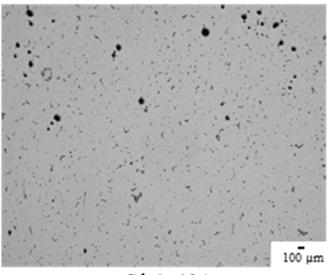
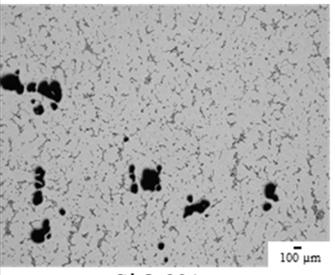
	Si7%スクラップ	Si5%スクラップ	
	580°C圧搾	620°C圧搾	615°C圧搾
不純物濃化部		 Si 11.1%	 Si 14.2%
高純度部	 Si 3.3%	 Si 1.4%	 Si 3.0%

図 4.3.5 分離前後の組織写真

フィルターを通過した不純物濃化部分と、残留した高純度部分では組織が大きく異なっている。 $\alpha$ -Al 相は高純度部分に多く存在し、不純物濃化部分は Si の多い共晶組織となっている。EDX により組成分析を行ったところ、Si7%スクラップ模擬材からは Si3.3%まで、Si5%スクラップ模擬材からは Si1.4%まで純化することが可能であった。Si 純度は圧搾温度によっても変化し、Si5%スクラップに対して 620°Cで圧搾を行った場合は Si1.4%となる。一方、より低温である 615°Cで圧搾した場合は Si3.0%と除去率は悪化した。また、収率と Si 濃度についてもまとめたグラフを図 4.3.6 に示す。

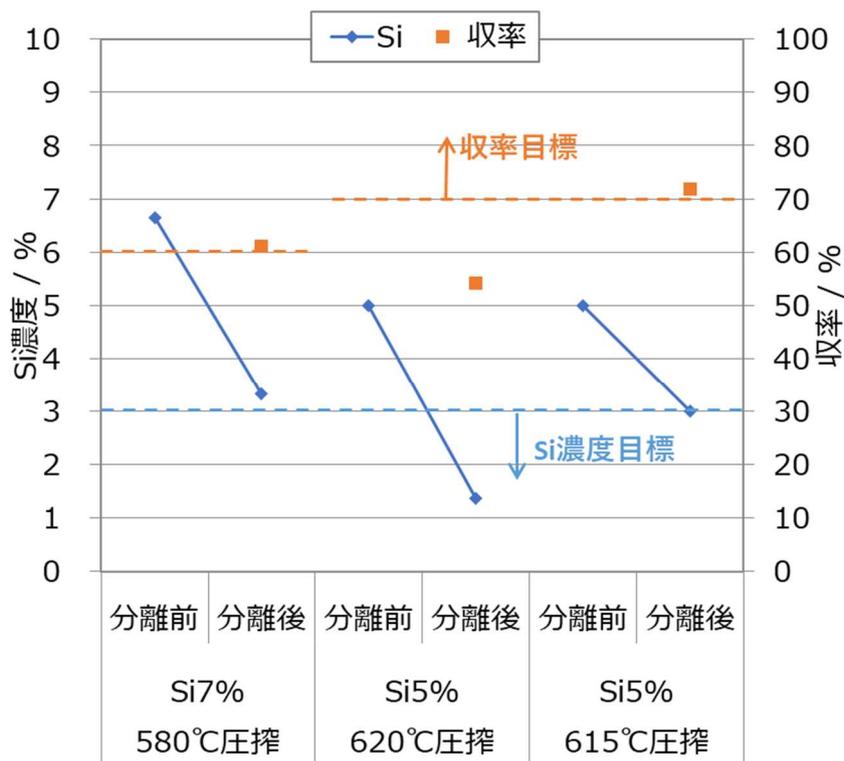


図 4.3.6 収率と Si 濃度についてまとめたグラフ

収率と Si 除去率はトレードオフの関係にあり、Si5%のスクラップ模擬材では 615°Cで圧搾した場合収率は 70%に達した。NEDO 基本計画の中間目標では Si5%以上のアルミニウムスクラップから Si3%以下の再生材を収率 70%以上回収することを目標としており、本結果ではこの目標は達成された。

#### 低 Si 材料に対する適用検討

本プロジェクトでは、メインターゲットとして自動車由来スクラップのような Si 量の比較的大きいスクラップを対象としている。これは、このような Si 量の多いスクラップは低品位と分類されるため、安価であり調達が容易になると考えられる一方、リサイクルが難しいことが想定され、技術開発による利点が大きいためである。一方、今回参加したユーザー企業側のニーズとして、今回のメインターゲットとしている材料の他、より Si 量の少ないスクラップ（熱交換器由来、サッシ由来など）、Si 量が多いダイカスト材料由来スクラップが挙げられた。そこで、熱交換器由来スクラップおよびサッシスクラップを用いて試験を行った。両者の外観写真を図 4.3.7 に示す。なお、実際の屑を使用する場合は表面積が大きいためロス（表面酸化物）の発生が多くなり、回収量の正確な評価が行えないため、今回は模擬材を用いて試験を行った。

## 熱交換器屑



## サッシ屑



図 4.3.7 熱交換器屑とサッシ屑の外観写真

サッシスクラップを用いた際の実験結果を図 4.3.8 に示す。SEM 写真を比較すると、純化部分では $\alpha$ -Al 相組織が見られる一方、不純物濃化部では微細な結晶組織となっている。SEM-EDX により組成分析を行ったところ、純化部分では元の素材に多く含まれている Mg、Si、Fe といった元素の濃度は低下しており、純度は Al 99.1%程度まで向上している。このように、比較的純度の高いサッシスクラップに対しても本手法が有効であることが示された。

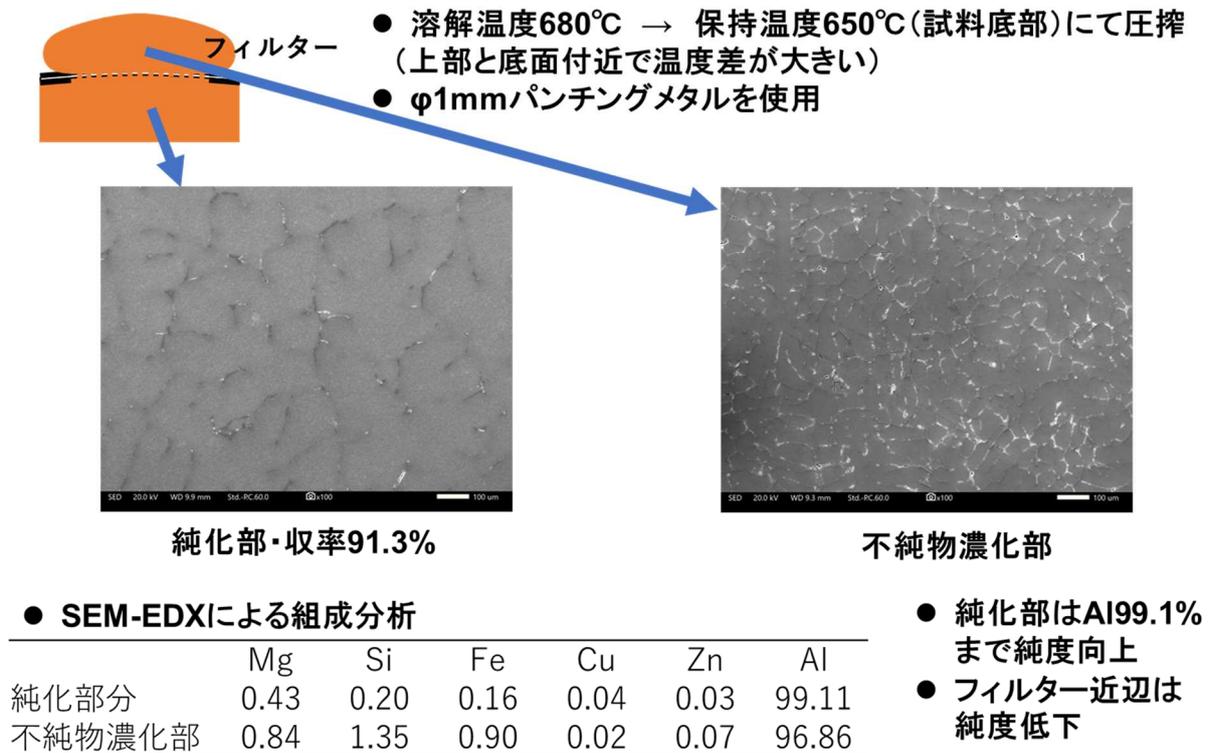


図 4.3.8 サッシスクラップを対象として行ったラボレベル試験結果

熱交換器スクラップを用いた際の実験結果を図 4.3.9 に示す。組織写真を比較すると、純化部分では $\alpha$ -Al 相組織が多く、粒界に共晶組織が見られる。一方、不純物濃化部では共晶組成が多くなっており、 $\alpha$ -Al 相組織も純化部に比べ微細となっている。

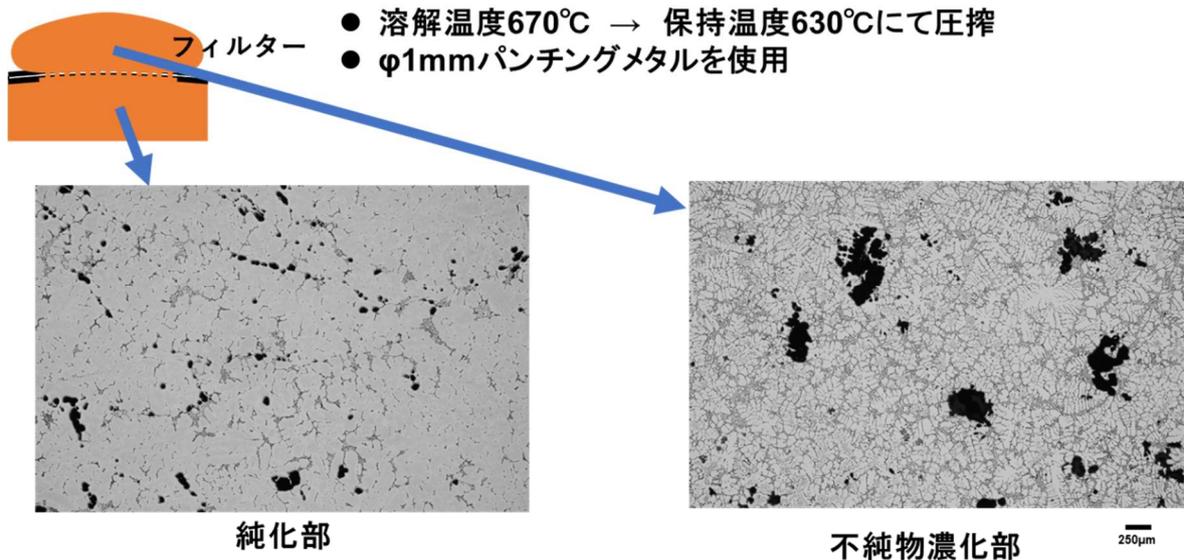


図 4.3.9 熱交換器スクラップを用いた際の実験結果

ICPにより組成分析を行った結果を図 4.3.10 および表 4.3.2 に示す。圧搾温度が低いほど収率は向上する。Si量はいずれの条件も 1.5%程度まで低下しており、不純物の除去が可能であることが分かる。一方、Si以外の元素についてみると、Cuに関してはSi同様、全ての条件で 30%程度の除去が可能であり、640°Cと高圧搾温度では 38%程度の除去が可能であった。Feに関しては 640°Cと高圧搾温度の条件のみ除去が可能であった。Mnについても 640°Cの条件で濃度が低下したものの、除去率は 20%程度である。Tiに関しては圧搾後において濃度が増加しているが、これは Ti は包晶系の凝固形態をとり、平衡分配係数が 1 を上回るためである。このように、合金元素によっては除去が難しいものがあるが、不純物元素として除去の必要性の高い Si や Fe については本手法が有効であることが示された。

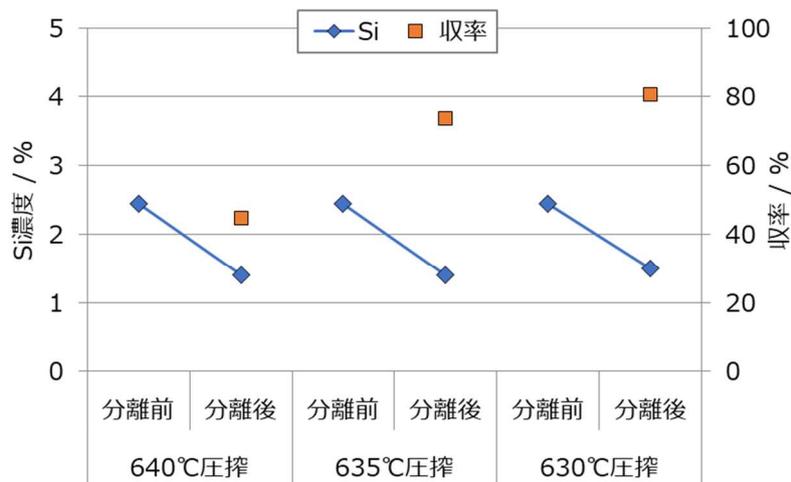


図 4.3.10 熱交換器スクラップの分離試験結果・Si 量の変化と収率

表 4.3.2 熱交換器スクラップの分離試験結果・各種元素量の変化

圧搾温度	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn
	%	%	%	%	%	%	%
640℃	1.4	0.11	0.25	0.19	0.74	0.31	0.65
635℃	1.4	0.14	0.19	0.35	0.98	0.37	0.71
630℃	1.5	0.13	0.17	0.36	0.95	0.35	0.72
元材	2.5	0.15	0.14	0.35	0.94	0.50	0.79

以上のように、比較的 Si の少ない展伸材由来のスクラップに対しても本技術の有用性が示された。今後、このような展伸材由来のスクラップを有効に再利用する技術も求められていることから、実用化に向けた大型化試験においてはこれら展伸材由来のスクラップに対しても検証を進めていく予定である。

### ①-2 溶解前処理によるスクラップ組成制御技術の開発

本研究項目では、溶解前工程において不純物元素の混入量を制御する技術を開発することにより、溶解工程に投入するスクラップに含まれる諸元素の成分を安定させ、後工程の効率化を図るとともに、不純物を多く含むスクラップの除去、および有用添加元素を多く含むスクラップについてはそれぞれに適した合金へ再生することにより、マテリアルフローの全体を最適化することを目的として、以下の検討を実施した。

#### a. 走査型分光ソータによる大量処理の制御限界ならびに使用コスト把握

##### ■ 目標

現行 LIBS の分析精度とコストの限界を検証し、現行機が実用で成立する条件を明らかにする。

##### ■ 研究開発の成果

#### ( i ) 市中スクラップの LIBS 選別試験

現在、アルミニウムを合金系または合金種別に選別する方法として最も有力なのは LIBS を用いた選別機である。すでにアルミニウムスクラップ選別用に LIBS が販売されている。そこでまずは市販の LIBS がどの程度有効なのかを検証するため、スクラップメーカーより入手した市中スクラップを原料に LIBS 選別試験を行った。市中老廃屑から風力、磁力、電流、重液の各選別を経て得られたアルミニウムスクラップを供試材として用いた。供試材の外観を図 4.3.11 に示す。これを 20mm アンダー、20-30mm、30mm オーバーに分級し、20-30mm と 30mm オーバーを LIBS 選別ラインに供した。合金の分類は 2000 系、3000 系、5000 系、6000 系、7000 系、Al other とした。Al other はケイ素含有量がおおよそ 7% 以上である鋳物・ダイカスト合金を想定した分類である。LIBS でこれらに分類できなかったものや、排出部でうまく排出できなかったものが unknown となる。30mm オーバーの選別結果を表 4.3.3 に示す。unknown が最も多く、50% を占める結果となった。unknown 以外では、6000 系が 32%、Al other が 8% と続いた。unknown は LIBS で判別できなかったものがほとんどであると考えられる。判別不能となるのはスクラップの表面様態や形状の影響が大きいと考えられ、今後検証を行い適切なスクラップ前処理条件を明らかにする。



図 4.3.11 供試材としたアルミニウムスクラップ

表 4.3.3 現行 LIBS での選別結果

分類	個数	重量(kg)	重量割合
2000系	31	0.87	0%
3000系	345	4.80	2%
5000系	768	18.25	7%
6000系	2355	78.00	32%
7000系	8	0.59	0%
Al other	464	20.70	8%
unknown	566	122.50	50%
合計	4537	245.7	

(ii) 分析精度検証試験

各元素の分析精度を検証するために、表 4.3.4 に示す各合金種のクリーンサンプルを用意し LIBS での精度検証を実施した。各サンプルについて固体発光分光分析を実施し、その分析値と LIBS での分析値を比較した。固体発光分光分析値と LIBS 分析値を元素毎に比較した結果を図 4.3.12 に示す。図中の点線上にプロットされるのが最も精度が良いと言える。結果としては、ケイ素、マグネシウム、マンガンは精度が良いことがわかった。銅は 0.5%以下の低濃度領域では若干高めに出ているが、全体的には精度は良かった。一方で鉄はばらつきが大きく、精度が低いことがわかった。また亜鉛は実組成に比べ大幅に低く出ており乖離が大きかった。この原因は LIBS 内部で設定されている検量線の問題であると推測される。亜鉛の精度が低く、7000 系の選別には疑念が持たれるものの、他の合金系は比較的高い精度で選別されたと考えられた。

また今回のクリーンサンプルでは形状は平坦であり、選別対象物の形状の影響は考慮できていない。その影響がどの程度あるのかはわかっておらず、今後検証を行う予定である。

表 4.3.4 精度検証用サンプル

合金系	合金種
1000系	4NAI
2000系	2014
3000系	-
4000系	4032
5000系	5052, 5083
6000系	6063, 6005C, 6061
7000系	7204
その他	Al-1%Fe

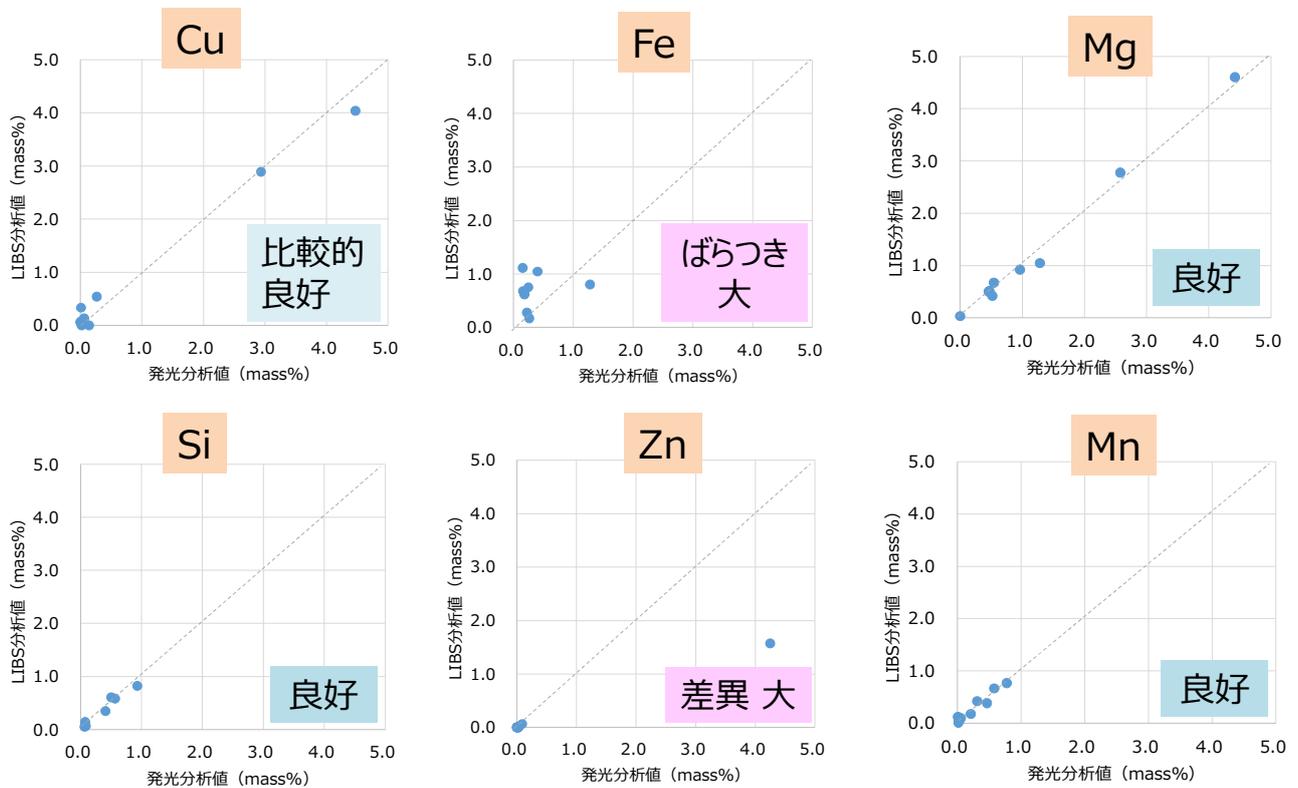


図 4.3.12 LIBS による各元素の分析精度検証結果

本研究項目では、2023 年度中にスクラップの表面状態、形状の影響を調査し分析精度、処理効率を検証することにより現行 LIBS が実用で成立する条件を明らかにする。現在まで特段の遅れは無く、2023 年度末に予定通り目標達成の見込みである。

## b. 走査型分光ソータ用制御システムの開発

### ■ 目標

コンベヤ上を移動する物体に対して 2D/3D 画像情報を併用して分光用レーザーの集光照射ポイントを自律的に決定する制御システムを開発し、これを搭載した簡易な走査型 LIBS ソータを試作して、その性能を明らかにする。

### ■ 研究開発の成果

現行の LIBS ソータでは、表面の平滑性が高く、ある程度浄化された無垢材料に対象が限定され、表面の形状が不規則な破砕片や表面に異物が付着したスクラップに対して判定不能や誤認率が高くなるという問題がある。本研究では、LIBS ソータのこのような欠点を克服するために、分光センサーの前段に配置した 2D/3D 画像センサーによりスクラップの外観と形状を認識し、深層学習を活用した AI 画像認識によって表面に付着している異物（鉄製ボルト、ビス、塗膜等）を瞬時に検出し、異物が存在せず表面形状が平滑な領域（LIBS 分析好適域）を推定して、LIBS 分析用レーザーの集光照射ポイントを自律的に選択する 3D 位置制御システムの開発を目指した。

#### (i) AI モデル高精度化、2D カラー画像データ拡充

先導研究の段階で、2D カラー画像の、セマンティックセグメンテーション型の AI 画像認識によって自動車由来のアルミニウム破砕スクラップに付着したボルト、ビス、塗装膜などの異物の検知が可能であることを確認している。本研究では、この AI の検知性能をさらに向上させるため、まず AI に学習させる教師データセットの効果的な構築方法について検討した。産総研所有の画像認識ソータ(ARENN ソータ)を用いて収集した塗膜付のアルミ破砕片の 2D カラー画像約 8000 枚から、約 1000 枚を抽出して AI 画像認識モデルに学習させる際に、教師画像の選定基準やセグメントの囲い方（屈折点の数と連結のルール、傾斜面及び平滑面の扱い方等）を変化させた 4 通りの AI モデルを作成し、推論結果を比較した。その結果の一例を図 4.3.13 に示す。ここに、上段の 4 枚の画像は、各 AI が未学習の検証用画像であり、赤色の折れ線は、各モデルにおいて学習用データセットを構築する際のルールに従って、「LIBS 分析好適域」を手作業（目視の判断）で明示したもので、折れ線の内側が推論の「正解」領域を示している（AI 入力画像にはこれらの折れ線は存在しない）。下段の 4 枚の画像は推論結果(出力画像)であり、AI が予測した「LIBS 分析好適域」が薄赤色で示されている。これらの領域が一致する割合が大きな程、無理のない学習が可能で優れたデータセットの構築方法であると考えられ、IoU(Intersection Over Union)値を用いて評価した。各モデルの検証用画像約 1000 枚の IoU の平均値(mean)を mIoU 値として最下段に記載した。本図より、これらの中で AI モデル 4 が最も高い mIoU 値となり、モデル 1 に対して約 2 倍の値となることが分かる。このように、教師データの与え方の工夫によって IoU 値は大幅に向上し、AI の予測が目視による判断に概ね一致するモデルを構築することが可能となった。

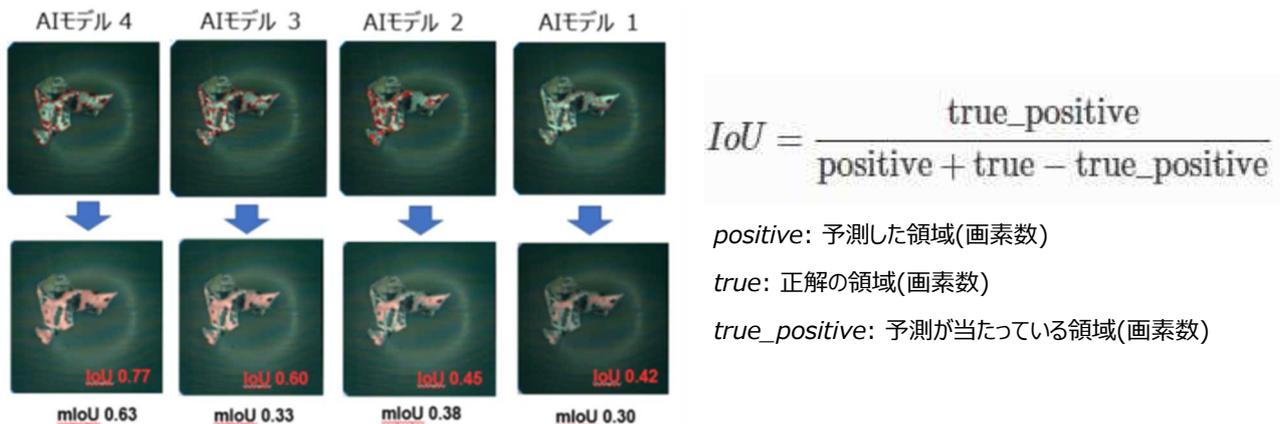


図 4.3.13 学習条件が異なる 4 通りの AI モデルによる「LIBS 分析好適域」の予測

実際に廃棄される自動車由来のアルミニウム破碎スクラップの塗装色は多様であり、AI の予測(汎化)性能を向上させるために、そのすべてについて実サンプルを収集することは多大な手間を有するため現実的ではない。そこで 1 枚の実物画像の塗装領域を AI で検知して、その塗装色を 12 通りに変化させた画像ファイルを一括生成して保存可能なプログラムを開発した。図 4.3.14 に塗装色が黒色のアルミニウム破碎スクラップの実物画像を使って、12 通りに色変換した画像の例を示す。表面の光沢感を維持しつつリアルな色変換がなされていることが分かる。現時点では、プログラムに入力する実物画像の塗装色として黒、青、赤の 3 色に対応しており、いずれかの色の実サンプルがあれば、直ちにこうした画像データの拡充が可能である。



図 4.3.14 塗装色変換による 2D 画像データ拡充

このような塗装色変換による 2D カラー画像のデータ拡充が AI の予測性能の改善に及ぼす効果を図 4.3.15 に示す。図中の左半分には、実物画像（塗装色：黒、青、赤）のみ約 1000 枚を学習させた AI モデルを用いて LIBS 分析好適域を予測した結果を示している。実物にある青色の塗装色のスクラップについては、AI が LIBS 分析好適域（薄赤色の領域）を出力するが、実物にない黄色、白、緑の塗装色のスクラップについては、AI は LIBS 分析好適域を予測できない。一方、図の右半分に示すように、塗装色変換画像 163 枚を追加して再学習させた AI モデルを用いた場合は、実物にない黄色、白、緑の塗装色のスクラップに対しても実物画像と同等かそれ以上の IoU 値で LIBS 分析好適域を予測可能であることが分かる。これにより、こうした 2D カラー画像のデータ拡充が AI モデルの予測性能の向上につながる事が確認できた。

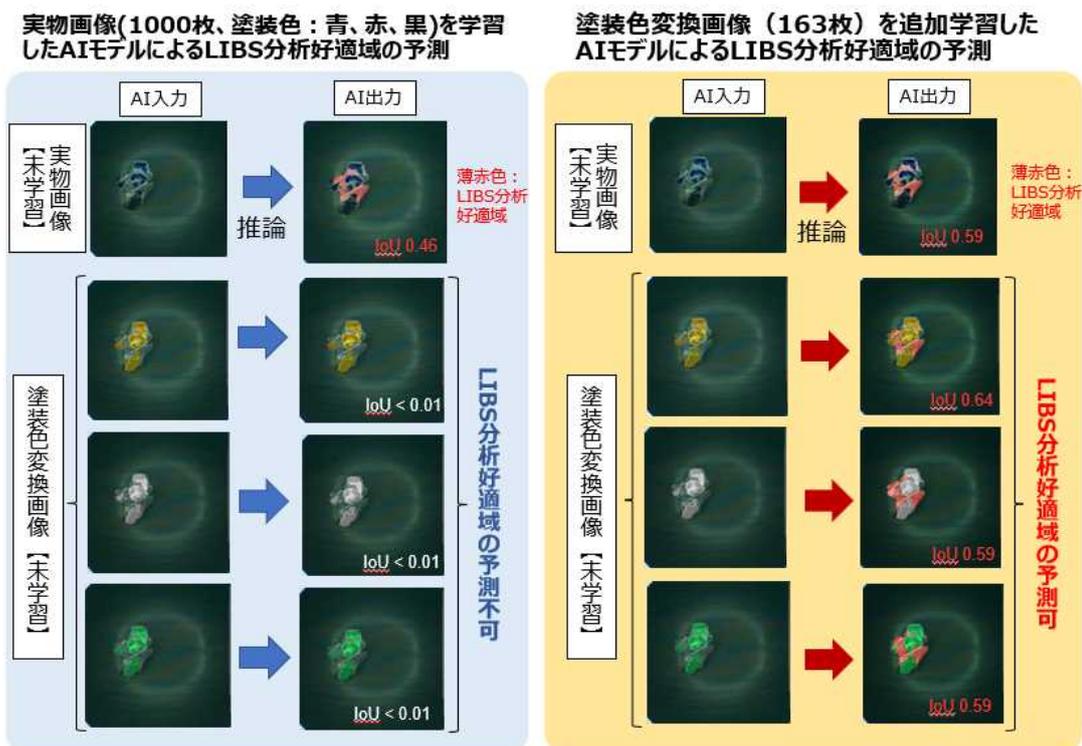


図 4.3.15 塗装色変換による 2D 画像データ拡充の効果

(ii) 3D 位置検知システムの試作、分光データの収集

本研究では、コンベヤ上を移動する物体に対して 2D/3D 画像情報を併用して分光用レーザーの集光照射ポイントを自律的に決定する制御システムの開発、並びに、これを搭載した簡易な走査型分光ソータ実験機の試作を進めている。現時点(2023年3月末)で、3D/2D 撮影光学系と LIBS 分析用レーザー照射/採光/分光光学系の設計と構成部品の調達を完了し、図 4.3.16 に示すように、ベルトコンベヤ(機長 4.0m、ベルト幅 0.3m)に組付けを行っている。3D カメラ、2D カラーカメラは共に、制御 PC へのデータ転送時にデータ欠損の発生が少ないライン式カメラを採用した。LIBS 分析部は、コンベヤ上に設置(2 層構造)した金属盤上に、ビームエキスパンダ、集光レンズ、レーザー scanner を固定したものである。写真にはないが、制御部として高性能 PC(Linux)を調達し、これらの機器を制御する各種プログラム開発を遂行中である。3D 画像データ解析と 2D カラー画像解析については、過去に開発実績があるので、それをベースにプログラム改良を進めている。

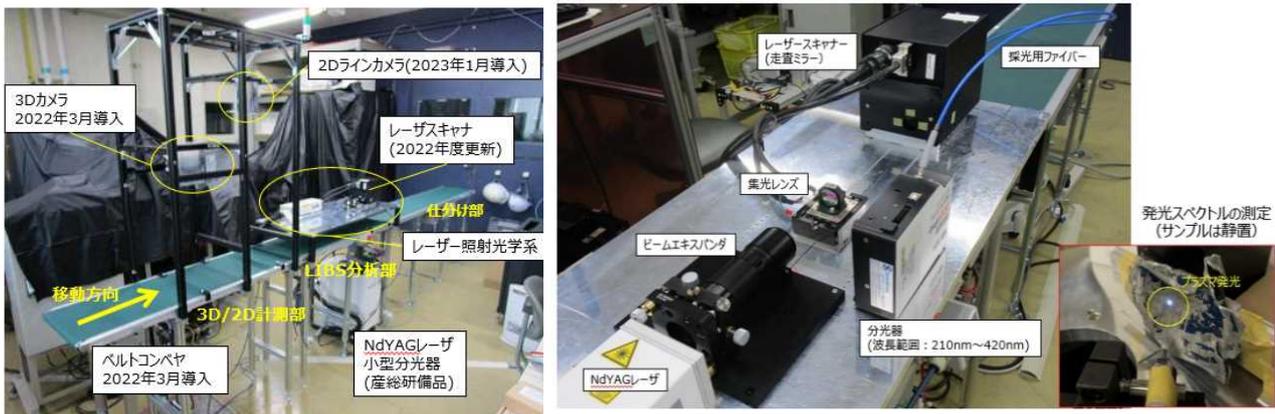


図 4.3.16 試作中の走査型分光ソータ実験機

現状の試作機においても測定サンプルを静置した状態でレーザーを集光照射してプラズマ発光スペクトルを計測可能なことから、成分元素組成が既知のアルミニウム合金 24 種の標準試料を入手し、プラズマ発光スペクトルデータの収集を進めるとともに、データ解析方法と検量線作成について検討した。図 4.3.17 にその一例を示す。本図の左側の波形グラフは 7204 合金標準試料で計測した発光スペクトル(上段)、ノイズ分離とベースライン補正後の発光スペクトルデータ(中段)、分離したノイズ成分(下段)を示している。ノイズ分離とベースライン補正は BEADS (Baseline Estimation And Denoising using Sparsity) 法を用いた。このような波形前処理を行った後、アルミニウムのスペクトル線 Al 396.1nm に対する合金添加元素のスペクトル線 (Cu 324.7nm、Si 288.1nm、Zn 334.5nm、Mg 383.8nm、Mn 403nm) のピーク強度比を算出し、各元素濃度(既知)に対してプロットすることで、添加元素の検量線を作成した。本図の右側に示すように、各元素の検量線は概ね直線近似が可能で、%のオーダーで元素濃度を算出可能であることを確認した。しかし、濃度が 0.1~0.5% 付近のスペクトル強度比にはばらつきがみられることから、0.1% のオーダーでの測定については、現状では難しいことが示唆された。今後、さらに光学系の改良と標準試料を追加測定することで定量分析の精緻化を進め、実サンプルの合金種判定精度について検証を行う予定である。

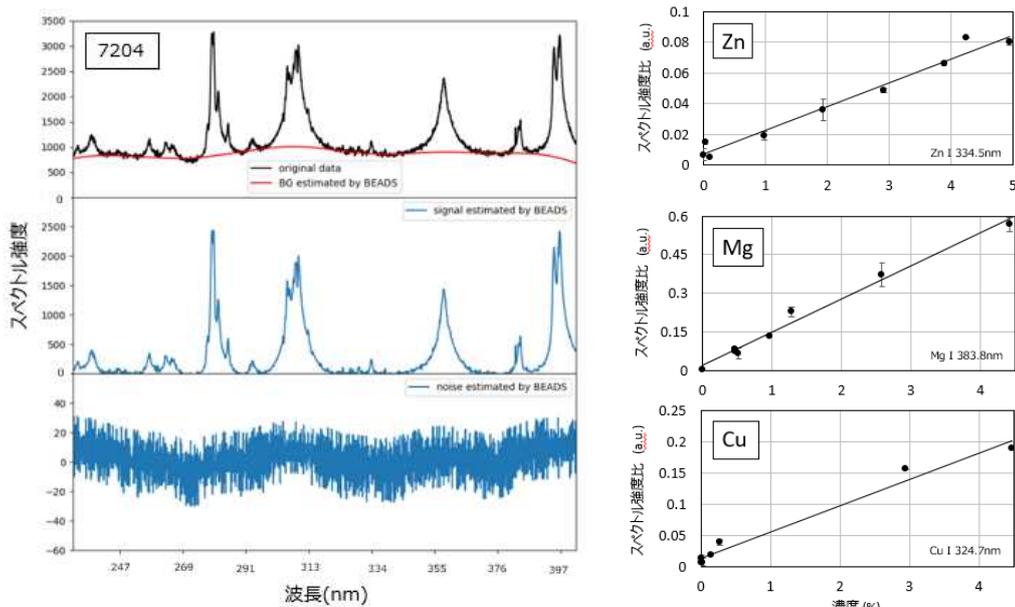


図 4.3.17 試作機で測定した発光スペクトル、合金成分元素の検量線の例

本研究項目では、2023 年度中に「2D 及び 3D 画像データを統合したデータ解析システムの開発」、「レーザー集光照射ポイント自立制御システムの開発」を進め、走査型 LIBS ソータ実験機の試作を完了し、性能を明らかにする予定である。現状において特段の問題はなく、2023 年度末に予定通り目標達成の見込みである。

#### 4.4 研究開発項目② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

##### 「資源循環型社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

##### 実施者名、実施体制

本事業においては、図 3.2 (p3-3) に示す NEDO 環境部が全体をマネジメントする体制の中、「研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発」に示す研究開発体制で実施している。研究開発項目②は、②-1 縦型高速双ロール鋳造を用いた不純物無害化技術 ②-2 加工熱処理による不純物無害化技術 ②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術 ②-4 LCA・戦略策定支援 ②-5 運営・規格化の 5 テマから成り立っており、図 4.4.1 にそれらの研究体制を示す。

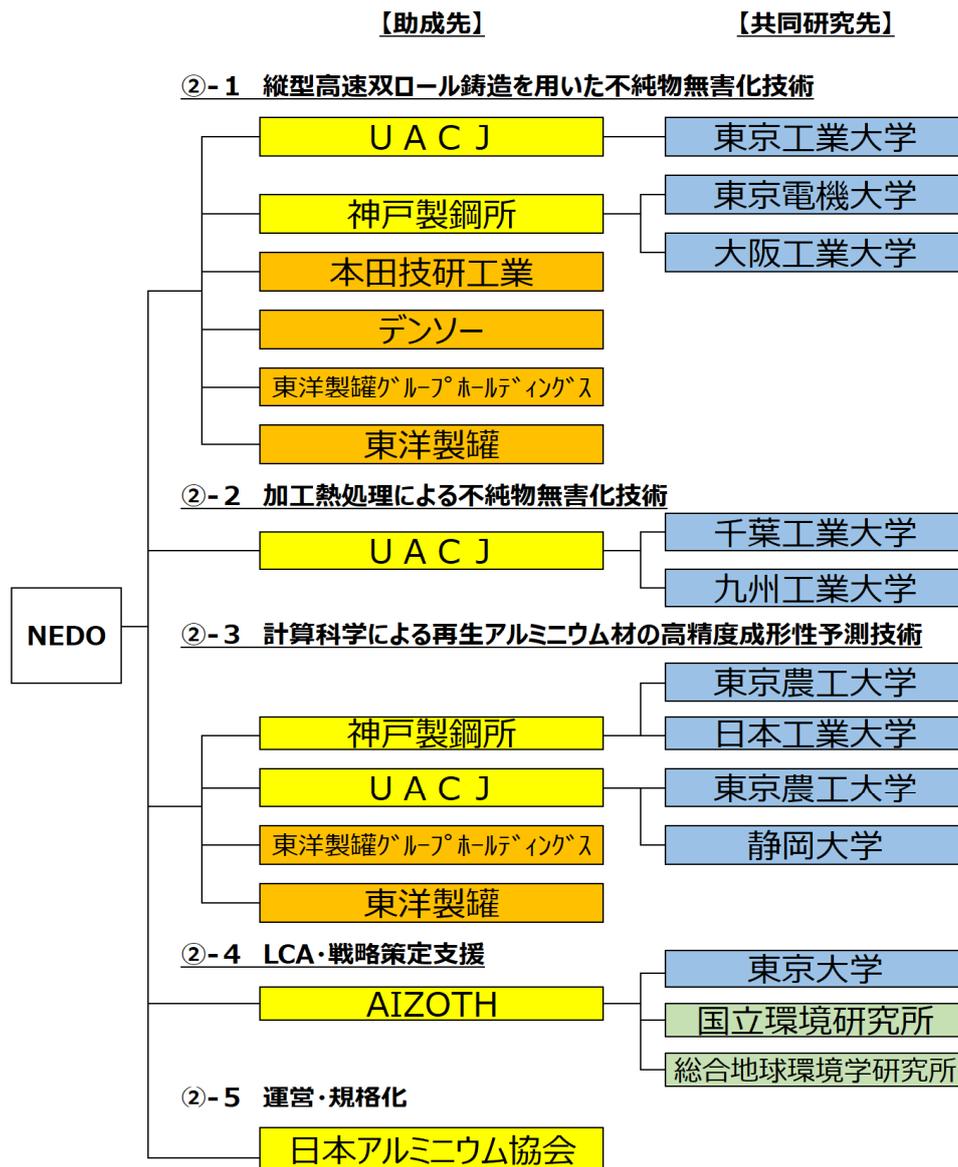


図 4.4.1 研究開発項目②「微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発」の研究開発体制詳細

##### 期間、予算

期間：2021年8月30日～2024年3月31日

予算：p3-2 参照

## 実用化への道筋

本プロジェクトでは ①不純物元素低減技術の開発 と ②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発の 2 項目を連携させ、アルミサイクルのマテリアルフロー完成を目指している。このリサイクルを実現するために最も重要な要素は、不純物元素の許容範囲が広い、多用途に使用可能な汎用展伸材用合金を新たに設定することである。今回の成果で鋳物スクラップから展開可能な汎用展伸材用合金組成への精製が可能であることと、その合金がプレス成形可能な一般材および高強度構造材のいずれにも適用できることが確認でき、本プロジェクトのコンセプトの正しさを実証することができた。

今後、本プロジェクトで量産化に必要な基礎技術を確立させた後、小規模量産が可能なパイロットプラントを経て、本格的な量産設備への移行を予定している。全体のスケジュールを図 4.4.2 に示す。



図 4.4.2 実用化への道筋

この 2 つの研究開発項目は、基本的にはシケンシャルに繋がっているが、設備特有のライン規模があるため、実用化に向けたパイロットプラントの規模なども異なっている。以下にそれぞれの実用化に向けての道筋を示す。

### 研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

現在導入を進めている 1 回当たり 10kg 程度の装置において実証試験を進め、大型化に伴い生じる課題解決を行う。助成事業終了後、次のステップとなるパイロットプラントを素材メーカーに設置し、小規模量産する。そこで材料の認証、標準化を進め、その後量産設備を導入する。不純物除去においては、1 回の処理量 100Kg 程度で 500t/年規模の生産能力を有する設備を 2027 年までに完成させる。本パイロットプラントにおいて生産される純化側素材を軽圧メーカーへ、不純物元素濃縮側の素材は鋳造用合金としてダイカストメーカーへ販売する。このパイロットプラントによる小規模量産で設備、条件改良を進め、2030 年ごろから 1 ライン当たり 1 万 t/年規模の量産設備を設置、幅広い普及を狙う。

### 研究開発項目② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

本研究開発項目で開発する 2 種の材料の実用化に対する道筋を以下に示す。

縦型高速双ロール鋳造機を用いる汎用成形用材料は、鋳造機の完成度を高めることが重要で、新規に導入する長尺実験機は溶湯供給、荷重制御、速度制御などの主要な機構は実機と同様であり、板幅が狭い以外は実用材相当の品質、特性が得られると予想している。この長尺実験機を使用して 2024 年度中に最適条件を確立し、2025 年度に最終目標を満足する材料の製造を可能にする。この材料をユーザー企業で評価するとともに、それぞれの製品に合わせたチューニングを行い、量産材レベルまで品質を向上させる。ユーザー企業での評価に当たっては高度成形シミュレーション技術の提供も実施し、プレス成形へのアシストを行う。

2026 年度以降、パイロットスケールに設備を拡大し、小規模な量産を行い、各ユーザー企業での認証試験を受

け、2030年度前後に、幅広（1.5～2m）の実機を完成させ、量産に移行する。

加工熱処理を用いる高強度構造材は2025年度までにIF-HPSおよびARBの条件を確定し、最終目標を満足する材料の製造を可能とする。この段階で、製造可能サイズ、特性、コストを考慮するとともに、ユーザー企業の意見も取り入れて実用化に進めるプロセスを決定する。2026年度以降、広く各ユーザー企業へのサンプルワークを進め、2030年度以降、少量量産に移行する。ARBの場合、2サイクルまでは通常の冷間圧延で対応可能であり、大型化に対する障害は少ない。IF-HPSの場合、必要に応じて広幅金型を導入する。

これらの材料の社会実装のドライビングフォースを大きくするためにLCA評価によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果を明確に提示する。また合金登録、ISO、JIS規格化を進め、新規ユーザーの参入を容易にすることで普及を加速させる。

## アウトプット目標の達成状況

各研究開発項目にアウトプット目標を設定している。以下に項目別に達成状況を示す。

### 研究開発項目②-1 縦型高速双ロール鋳造を用いた不純物無害化技術

本研究開発項目では縦型高速双ロールの急冷効果を利用して、不純物が多く、鋳物組成に近いサイクル想定合金の機械的特性を汎用成形用展伸材として使用できるレベルに向上させることを目指している。具体的な目標値として、代表的な自動車ボディ材である6022-T4材（引張強さ250MPa、伸び30%）を基準に、引張強さ同等、伸び0.8倍(中間)、0.9倍(最終)を設定した。目標値を従来材より落としているのは、従来の展伸材は機械的特性を最優先としているのに対し、本開発材は、リサイクル性を優先して材料設計したためである。すなわち、機械的特性をやや犠牲にしてでもリサイクル性を向上させるという従来とは発想から変えている。この伸びの低下に対して成形性を確保するために研究開発項目②-3で高度成形シミュレーションに取り組んでいる。

本開発項目には3件のサブテーマがあり、②-1-1では実機同様の機能を備えた長尺実験機の製作、②-1-2では小回りが利く小型実験機を用いて鋳造条件を最適化し、目標値のクリアを目指すとともに、長尺実験機的设计、および後述の短尺広幅実験機の鋳造条件改善にも反映させる。②-1-3では短尺広幅実験機を用いてユーザー企業の評価が可能な広幅材料の試作を行う。

現在の達成状況は、②-1-1の長尺実験機の導入が、半導体不足等の影響等で、本体完成予定が23年度末と予定より遅れているものの、②-1-2の小型実験機ではチャンピオンデータではあるが、既に中間目標を上回る引張強さ310MPa、伸び24.7%を達成し、予定より大幅に早まっている。また②-1-3の広幅短尺実験機による試作とユーザー評価は予定通り始まっており、まだ安定した性能を有する材料供給が出来ていないものの、小型実験機の成果を取り入れた改良材の試作、評価も進んでいる。これらの状況をまとめて表4.4.1に示す。小型実験機、広幅短尺実験機による研究開発を促進させ、長尺実験機の完成度を高め、完成後早期に条件最適化を図ることで、長尺実験機導入の遅れは十分挽回可能である。

表 4.4.1 研究開発項目②-1 縦型高速ダブルロール鋳造を用いた不純物無害化技術のアウトプット達成状況

大分類	中分類	小分類 (要素技術)	目標と達成状況 (当初計画との差異)
②-1 縦型高速ダブルロール鋳造を用いた不純物無害化技術	②-1-1 縦型高速ダブルロール鋳造の連続操業技術開発	長尺縦型高速ダブルロール鋳造機 (長尺実験機) による長時間安定操業技術確立	<b>中間目標:</b> 長時間安定操業技術確立を目的とした板材の長尺化に対応可能な長尺実験機を完成させ、引張強さ250MPa、伸び24%を有する板材を製造する。 <b>達成状況:</b> △ …設備導入遅れにより、材料特性目標は小型実験機で達成する。東工大で長尺実験機本体の入札を実施した。落札した設備メーカーに設計・製造を発注し、基礎設計が完了した。 2024年3月に長尺実験機本体完成見込み (当初計画より遅れ)。
	②-1-2 縦型高速ダブルロール鋳造板の表面、内部組織の改善	小型実験機を用いた最適鋳造条件の確立	<b>中間目標:</b> 鋳造条件、ノズル材質・形状、ロール材質・表面溝形状等を最適化し、引張強さ250MPa、伸び24%を有する板材を製造する (実施計画書(P28、16行目))。 <b>達成状況:</b> ◎ 鋳造の低荷重化・高速化で大きく特性が改善され、中間目標値を超える引張強さ310MPa、伸び24.7%を予定の2024年3月より早い2023年2月に達成した。割れが少ない表面が得られるノズル形状、ロール表面テクスチャーを見出した。 2024年3月に性能安定化の方策確定見込み (当初計画より大幅に短い期間で達成)。
	②-1-3 広幅試作材の製造と各種評価	対象製品毎の個別条件・基準による評価	<b>中間目標:</b> 広幅短尺実験機で製造した板材を製品用途ごとに評価し、実用化に向けた課題を抽出する。 <b>達成状況:</b> ○ 小型実験機の結果に基づき、低荷重化・高速化で広幅短尺実験機材の表面状態を大きく改善できた。ばらつきは大きいものの、中間目標を超える特性が得られた。早期課題把握のため、改善前ではあるが、板材サンプルを各ユーザー企業で評価した。 2024年3月に実用化を目指す製品の絞り込みまで進む見込み (当初計画との差異なし)。

### 研究開発項目②-2 加工熱処理による不純物無害化技術

本研究開発項目では鋳物組成に近いサイクル想定合金を巨大ひずみ加工と熱処理を組み合わせることで、高強度構造部材用材料として使用することを目指している。具体的な目標値として、代表的な構造用材料である 6061-T6 (引張強さ 333MPa、伸び 15%) を基準として、伸び同等で、引張強さを 1.2 倍 (中間)、1.5 倍 (最終) を設定した。この目標値は従来材より高いが、この目標値を達成できれば 2000 系、7000 系の高力アルミニウム合金や、1.5GPa クラスのハイテンにも十分対抗でき、巨大ひずみ加工等の追加工程によるコストアップを吸収できる。

実用可能な大型の板材 (目標: 幅 200mm、長さ 300mm の A4 サイズ) を製造できる巨大ひずみ加工法としては逐次繰り出し高圧スライド加工 (IF-HPS)、および繰り返し重ね圧延 (ARB) の 2 種を選定した。また、性能確認のための基礎研究では、小型ではあるが小回りが利く HPS 加工、および高圧ねじり加工 (HPT) を用いた。

②-2-1 の IF-HPS では、一回のスライド量、スライド回数を適正化することで、幅 200mm の A4 サイズの板の製造を既に達成しており、小型の HPS ではあるが、板厚 0.9mm、スライド量 15mm の条件で、Cu を含まない Si 量 3% のリサイクル想定合金を加工することで引張強さ 473MPa、伸び 14% と中間目標をほぼ達成することができた。

②-2-2 の ARB では、3%Si リサイクル想定合金を溶体化後に時効処理することで引張強さ 399MPa、伸び 17% と、これもほぼ目標値を達成することができた。これらはいずれも中間目標に対して予定より早い進捗状況である。これらの状況をまとめて表 4.4.2 に示す。

表 4.4.2 研究開発項目②-2 加工熱処理による不純物無害化技術のアウトプット達成状況

大分類	中分類	小分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
②-2 加工熱処理による不純物無害化技術	②-2-1 IF-HPSを用いた大型化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広幅化のためのIF-HPS加工条件（加工量・加工パス・加工圧力）の最適化</li> <li>・ 機械的特性向上のための、HPT加工による、加工条件（加工量・加工圧力・加工温度）の最適化</li> </ul>	<p><b>中間目標：</b>                      (1)IF-HPSの大型化、広幅短尺実験機材を用いて幅200mm材の作製                      (2)引張強さ：400MPa以上、伸び：15%以上  <b>達成状況：</b>(1)(2)ともに◎                      ・IF-HPSの1パスあたりのスライド加工量を3mmとして、5パスの加工での加工を行うことで、割れなく板幅200mmの大型材を製造できた。                      ・Cuレス材を用いHPSスライド量を15mmとすることで、中間目標をほぼ達成した特性（引張強さ473MPa,伸び14%）が得られた。                      2023年2月に中間目標を達成（当初計画より大幅に短い期間で達成）。</p>
	②-2-2 ARBを用いた大型化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機械的特性に及ぼすARB圧延パス数の影響評価</li> <li>・ ARB加工と、その前後での熱処理の影響評価</li> </ul>	<p><b>中間目標：</b>                      (1)広幅短尺実験機材を用いて、効果発現のための最小加工ひずみ（圧延パス数）を明確化する                      (2)引張強さ：400MPa以上、伸び：15%以上  <b>達成状況：</b>(1)(2)ともに◎                      ・ARB加工において、中間目標とする機械的特性（引張強さ：400MPa以上、伸び：15%以上）を達成するための最小加工ひずみを明確化した。                      ・溶体化、自然時効後に、人工時効（170℃×5時間）を行うことにより中間目標をほぼ達成した特性（引張強さ 399MPa,伸び17%）が得られた。                      2023年2月に中間目標を達成（当初計画より大幅に短い期間で達成）。</p>

**研究開発項目②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術**

本研究開発項目では、従来の一般的な展伸材と異なった特性を有する再生展伸材を使用してプレス成形品を製作する際の形状設計、型設計、成形条件などをサポートすることで普及を促進することを目指している。そのためには、アルミニウム板材の成形シミュレーションをより高度化し、精度を向上させる必要がある。②-3-1 では、そのために材料の多軸応力特性を実測し、精度の高い材料モデルの構築を行った。予定通り、従来材である 5083-O を用いた材料モデル構築に続き、②-1-3 で製造したりサイクル想定材についても測定を実施した。今後、自動車部品を想定したモデル金型での実際のプレス成形結果と対比させることで、より精度を向上させる。②-3-2 では手間と時間がかかる多軸応力特性の測定をごく短時間で取得できるバーチャル材料試験法の確立を目指しており、従来材である 5083-O を用いて予定通りシステムを確立することができた。今後リサイクル想定材についてもバーチャル試験法を確立する。これらの状況をまとめて表 4.4.3 に示す。

表 4.4.3 研究開発項目②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術のアウトプット達成状況

大分類	中分類	小分類（要素技術）	目標と達成状況（当初計画との差異）
②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術	②-3-1 多軸応力試験による再生アルミニウム材の高精度材料モデルの構築と実験検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高精度材料モデル構築</li> <li>・試作モデル材の成形性評価とフィードバック</li> </ul>	<p><b>中間目標：</b>                      ・試作再生材の多軸応力特性などを実験により直接測定し、高精度材料モデルを構築する。また、このモデルを活用し、成形シミュレーションの破断近傍板厚ひずみ予測誤差を従来手法より1/2以下に低減する。  <b>達成状況：</b>○                      ・試作再生材の材料特性を採取し、高精度材料モデルの構築完了。                      ・素材の多軸応力特性の測定について、十字引張試験片による厳密な測定法に加え、簡易な「外接多角形による降伏関数同定法」を整備した。                      ・自動車部品の金型モデルを作成中。上記構築モデルを用いて試作再生材の評価を実施し、計画通り2024年3月に中間目標を達成見込み（当初計画との差異なし）。</p>
	②-3-2 結晶性モデルおよび機械学習による再生アルミニウム材の材料モデル高速推定システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高精度、高速推定システム開発</li> </ul>	<p><b>中間目標：</b>                      ・バーチャル材料試験により構築した材料モデルを用い、成形シミュレーションの破断近傍板厚ひずみ予測誤差を従来手法より1/2以下に低減する（精度評価は②-3-1で一括実施）  <b>達成状況：</b>○                      ・多軸応力試験結果を高精度に再現可能な材料モデルをバーチャル材料試験から構築する手法の整備を完了した。                      ・材料の組織情報と基礎力学特性から材料モデルを高速に推定可能なシステムを整備した。                      ・交差負荷試験法およびその結果を高精度に再現可能な結晶塑性有限要素モデルによるバーチャル材料試験法を整備した。                      ・バーチャル材料試験および高速推定システムによって構築した試作再生材の材料モデルの評価を実施し、計画通り2024年3月に中間目標を達成見込み（当初計画との差異なし）。</p>

## 研究開発項目②-4 LCA・戦略策定支援

本研究開発項目は本助成事業の目的である GHG 削減効果について把握し、将来を予想することで、社会実装した際の成果を評価する。さらに AI を用いて製造プロセス最適化を促進する。現在は小型実験機のデータを用いて LCA 評価を予定通り実施している。今後、新規設備導入後にアップデートを行う。

## 研究開発項目②-5 運営・規格

本研究開発項目は多くの項目間の情報を共有化し、方向性を保つことを目的としており、研究開発推進会議、実務者会議を定期的に開催した。また、情報管理を一元化し、知財合意書の作成も完了した。研究開発がある程度進んだところで、ISO、JIS 等の規格化を進め、開発するリサイクル材の普及に寄与する。②-4、②-5 の達成状況を表 4.4.4 に示す。

表 4.4.4 研究開発項目②-4 LCA・戦略策定支援、②-5 運営・規格 のアウトプット達成状況

大分類	中分類	小分類 (要素技術)	目標と達成状況 (当初計画との差異)
②-4 LCA・戦略策定支援		LCA・AI解析 将来需要推計	<b>中間目標：</b> ・実証スケールにおけるインベントリデータの収集と、コスト・環境影響評価を行う。 ・AIを用いたプロセス最適化手法を、研究開発項目①②の技術に適用する。 ・国内外のアルミニウム使用製品の将来需要を推計するための手法の開発を行う。 <b>達成状況：</b> ○ 仮の実証機データに対してLCA評価を実施し、実データ入手後に推計内容をアップデートする。さらに、将来需要推計については、特定のアルミニウム使用製品(飲料缶)について、空間情報、ウェブ情報、統計情報、技術情報等を活用したケーススタディを実施することで、計画どおり2024年3月に中間目標達成見込み(当初計画との差異なし)。
②-5 運営・規格化		委員会運営、情報管理、調査結果反映、 ②-4との連携及び規格化準備	<b>中間目標：</b> 委員会設置によるテーマをまたいだ横ぐし情報交換での研究開発推進、情報管理体制構築、文献・特許・市場調査結果の反映、環境負荷・コスト削減(②-4テーマ)の将来的技術課題明確化連携及びISO国際規格化のための準備。 <b>達成状況：</b> ○ 年数回の研究開発推進委員会及び実務者会議開催で研究開発推進、知財合意書運用による情報管理、②-4へのデータ協力、委員会の場での調査共有化及び文献調査のなかで国内外規格の現状把握により、計画通り2024年3月に中間目標達成見込み(当初計画との差異なし)。

## 成果の意義

本プロジェクトではアルミニウム鋳物を含む、不純物元素が多いスクラップを展伸材に展開するアップグレードリサイクルを目指している。そのために不純物元素の低減と無害化技術を開発しているが、このリサイクルを実現するために最も重要な要素は、不純物元素の許容範囲が広い、多用途に使用可能な汎用展伸材用合金を新たに設定することである。今回の成果で鋳物スクラップから展開可能な汎用展伸材用合金組成への精製が可能であることと、その合金がプレス成形可能な一般材および高強度構造材のいずれにも適用できることが確認でき、本プロジェクトのコンセプトの正しさを実証することができた。本プロジェクトの二つの研究開発項目 ①不純物元素低減技術の開発 と ②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発について、以下にそれぞれの意義を示す。

## 研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

本プロジェクト開始以前に、Si4%~11%を含むアルミスクラップ模擬材において、電磁攪拌によるα-Al相晶出量の増加を確認している。本プロジェクトにおいては、溶湯量100g程度の小規模試験においてAl-7%Si程度のスクラップからSi3%程度までの純化、収率60%、Al-5%Si程度のスクラップからSi2%以下までの純化、収率60%を達成した。また、温度の条件などにより収率やSi除去率を変化させることができることが可能となった。また、先行してより低Siのスクラップ(熱交換器由来、サッシ由来など)についても試験を行い、不純物除去が可能であることを確認し

た。これらの成果により、本手法による不純物元素低減が可能であることが実証され、今後実施する一回当たり 10Kg 程度のスケールアップ実験のための有用なデータが得られた。

副次的な成果としては開発装置（電磁攪拌装置）の従来合金（リサイクル合金以外）への展開、電磁攪拌装置による組織微細化などの展伸材用アルミニウム素材の特性向上、Fe、Mn などの除去による、鑄造用アルミニウム合金の特性向上等も期待できる。

## 研究開発項目② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

本技術の実用化に向けて、研究開発項目①で精製された組成を想定したリサイクル合金を用いて縦型高速双ロール鑄造機の小型実験機を用いて一般展伸材の試作を行った。その結果、中間目標である引張強さ 250MPa、伸び 24%をクリアすることができた。さらに HPS、ARB 等の巨大ひずみ加工を利用したプロセスで、中間目標である引張強さ 400MPa、伸び 15%もほぼ達成することができた。さらに試作の過程で、材料の表面品質や強度、伸びなどの特性に影響を与えるプロセス条件やそのメカニズムに関する知見が得られた。これらの結果は今後のスケールアップ実験や実用化のための有用なデータとなっている。

副次的な成果として、縦型高速双ロール法をリサイクル材だけではなく、従来の展伸材アルミニウムにも展開できることが挙げられる。本手法を使うことで、製造工程に必要な均質化処理工程、熱間圧延特が不要になり、製品製造時間の短縮や、製造に必要なエネルギーの削減、製造工程が簡略化されることにより設備設置面積を小さくすることが出来、設備増設を行う場合のメリットとなる。さらに加工熱処理法を 3000 系などの耐食性が優れた合金に展開することで、中強度かつ高耐食性の材料を製造したり、2000 系などの高力系合金であれば 1GPa クラスのハイテンに匹敵する超高強度材を得ることも可能となる。このようにリサイクル材以外のアルミニウム合金への適用が期待できる。

両研究開発項目共通の副次的成果として人事育成に注目すると、新たな展伸材を一から設計する今回のプロジェクトを通じて総合的なプロセス設計技術の習得に極めて有効ある。さらにマテリアルフローの各業界との交流を通じて、異業種交流の重要性を認識することができた。

## 研究開発成果の詳細

### ②-1-1 縦型高速双ロール鋳造の連続操業技術開発 (UACJ) (共同研究先：東京工業大学)

鋳造材を含むスクラップを想定した不純物が多いアルミニウム合金を、縦型高速双ロール鋳造を用いて急冷凝固させることで、晶出物を微細化し、延性低下の抑制を目指している。縦型高速双ロール鋳造の小型ラボ実験機の概略を図 4.4.3 に示す。本手法では一対の水冷却された銅合金製のロールの上に、サイドダムとノズルで溶湯プールを形成し、ロールを高速で回転させることで一気に薄板を鋳造する。従来の横型双ロール鋳造と異なり、ロール荷重が小さいことが特徴である。荷重が小さいために、熱伝導性に優れた銅合金製のロールの使用が可能となった。熱伝導性の高いロール材質に加え、溶湯プールによる長い溶湯とロールとの接触長さのために、高速かつ急冷凝固となる鋳造可能となる。鋳造速度は 30~80m/min と横型双ロール鋳造の 20 倍程度あり、1 台で年間 20 万トンの生産能力となる。これは大型熱間圧延機に近い生産性であり、省エネルギー、設置面積、設備費用の面でのアドバンテージが大きい。また凝固時の冷却速度は 1000K/sec に達し、横型双ロール鋳造の 10 倍以上、従来の DC 鋳造の 500-1000 倍にもなる。図 4.4.4 にスクラップから混入する Fe を 1.0%まで増やした 6022 合金を、金型鋳造と縦型高速双ロール鋳造で製造した時の晶出物分布を示す。冷却速度を反映して縦型高速双ロール鋳造のほうが著しく晶出物が微細化しており、延性改善に有効なことが判る。

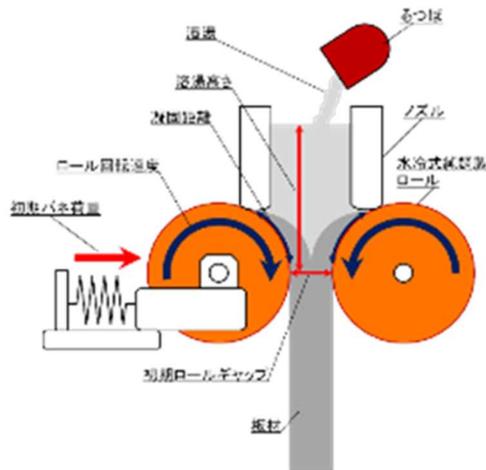


図 4.4.3 縦型高速双ロール鋳造機の概要

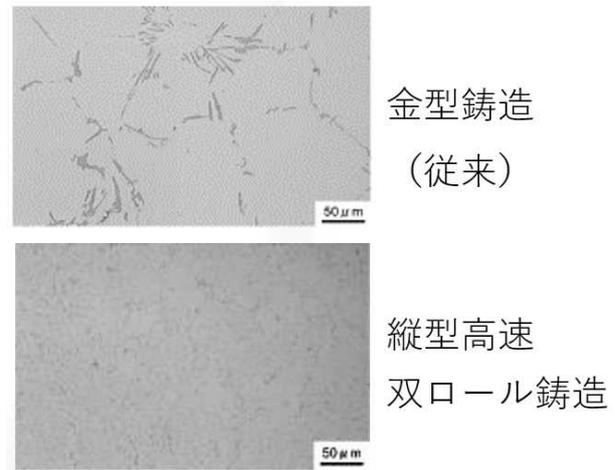


図 4.4.4 6022+ 1.0Fe の晶出物

これはラボスケールの小型実験機で実施したものであり、少量の溶湯を用いて短時間（数秒～十数秒）で製造した。この条件では、実際の操業とは異なり、ロール温度、冷却速度、溶湯湯面高さが一定となる定常状態に達する前に製造が終了していた。従って実用化を目指す場合、これらの条件が一定となる定常状態での試作・評価を行う必要がある。図 4.4.5 にロール各部の鋳造開始からの温度変化のシミュレーション結果を示す。この例のように、ロールは溶湯と接する表層付近が最も高温となり、ロール回転 1 周ごとのサイクリックな温度変化を示す。鋳造開始から時間が経つにつれて各部の温度が上昇し、この例では鋳造開始から 90 秒で各部の温度が一定になり、熱収支バランスが取れた定常状態となっていることが解る。従って、定常状態での操業を実現するためには、少なくとも数分間の連続稼働が可能な溶湯量と、製造した材料を蓄える後面設備が必須である。さらに長時間の安定した操業を行うためには、ノズル内の溶湯液面高さを一定に保つことが重要となる。そこで、200mm幅の長尺縦型高速双ロール鋳造実験機（略称長尺実験機）を新たに導入する。本長尺縦型実験機には大容量（200kg 程度）の溶解設備、溶湯湯面高さを自動的に一定に保つ溶湯供給装置、短時間で熱的平衡に達するための強力なロール水冷装置、任意の長手位置のサンプルを得ることが可能な後面設備を設ける。図 4.4.6 に導入する長尺縦型実験機のレイアウトを示す。鋳造機

本体（双ロール部）を床面に配置し、後面設備は地下に設置することで、溶解炉及び溶湯供給部の高さを下げ、安全性を高めている。この長尺実験機を用い、②-1-2の結果も取り入れて定常状態における実機 casting を再現し、実用化に繋げる。本実験機導入にあたり、鑄造機本体の設計、導入は、以前から縦型高速双ロール鑄造実験機を用いて研究開発を実施してきた実績があり、多くのノウハウを有する東京工業大学が担当する。ただし、長尺化するためには大量の溶湯を扱う必要があり、冷却水、電力、高圧空気などのインフラや後面設備設置のためのスペースなども欠かせない。また、安全にオペレーションするためには、大量の溶湯を取り扱う専門の作業員が必用であるが、これらは大学の研究室では対応が困難である。そこで溶解炉、溶湯供給部、後面設備等の鑄造機本体以外の周辺設備をUACJに設置し、そこに鑄造機本体を組み込む。入札による設備メーカーの選定、発注が終了し、本体および周辺設備の設計が完了した。半導体不足などの影響で、当初の予定より遅れたものの、23年度末に鑄造機本体が完成し、24年度から稼働開始の予定である。

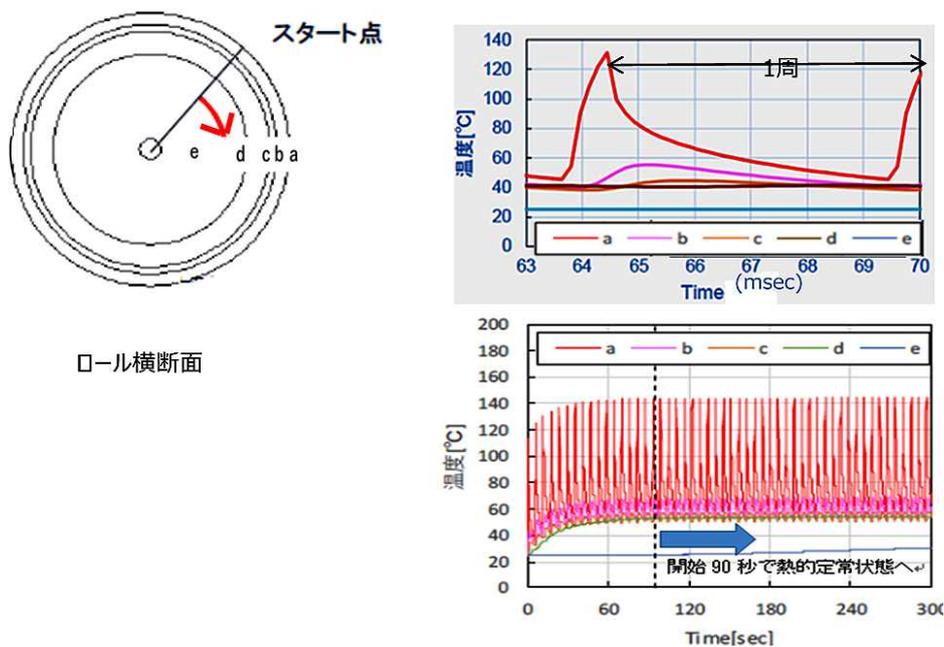


図 4.4.5 ロール各部の鑄造開始からの温度変化（シミュレーション）

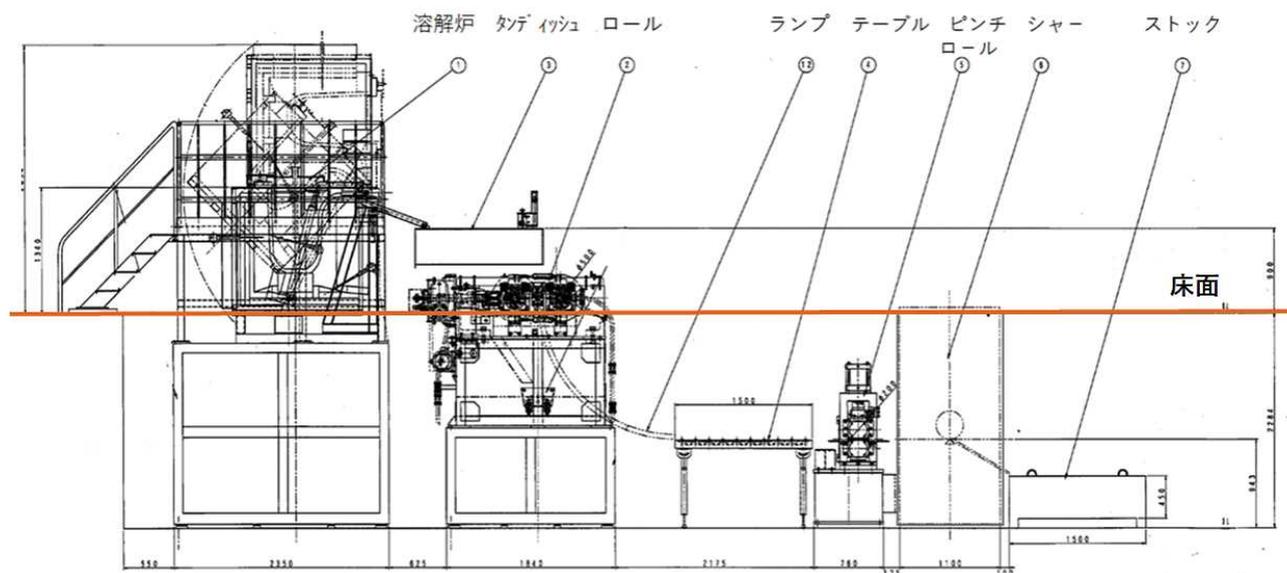
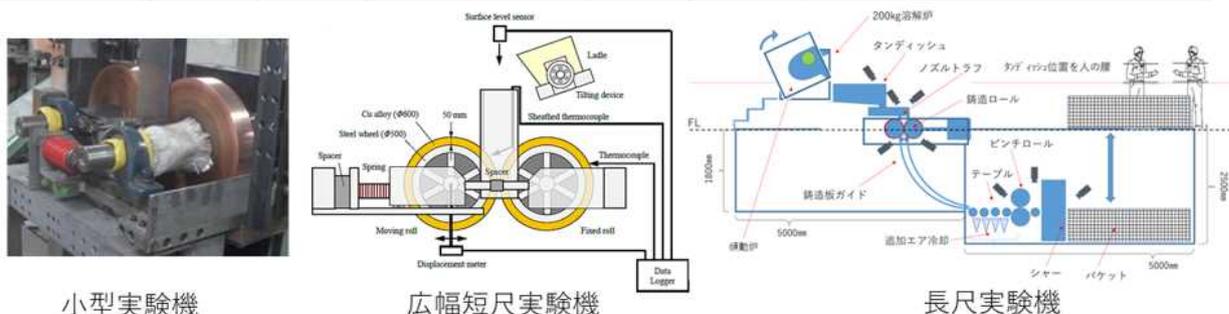


図 4.4.6 長尺実験機のレイアウト

本プロジェクトでは、新たに導入する長尺実験機と大学にある小型実験機および外注の広幅短尺実験機の3種類の縦型高速双ロール鋳造機を使用する。長尺実験機は前述の通り、定常条件での鋳造を実現することで実機を再現し、実用化を目指すことが目的で、小型実験機はロール荷重、速度、ロール表面形態、溶湯湯面高さ、ノズル形状等の鋳造条件の最適化を目指し、長尺実験機の改良、条件設定に役立てる。広幅短尺実験機は各ユーザー企業で評価する試験材を作製することが目的であり、鋳造条件は小型実験機の成果を盛り込んで最適化する。これらの3種の実験機の仕様、目的をまとめて表 4.4.5 に示す。

表 4.4.5 3種の縦型高速双ロール鋳造実験機の概略仕様と目的

名称	板幅 (mm)	鋳造時間	溶湯供給安定性	熱的安定性	荷重制御	板厚制御	目的
小型実験機	50-100	数秒	×	×	△	△	鋳造条件、ノズル、ロール表面最適化による中間目標達成のための鋳造技術確立
広幅短尺実験機	600	数秒	×	×	△	△	各種用途向け特性評価
長尺実験機 (新設)	200	2-4分	○	○	○	○	量産に向けての安定製造技術確立



## ②-1-2 縦型高速双ロール鋳造材の表面、内部組織改善 (神戸製鋼所) (共同研究先: 東京電機大学、大阪工業大学)

### (1) 鋳造条件の適正化による改善

適切な鋳造条件を調べるため、ロール周速、凝固距離、初期ロール荷重の組み合わせにより鋳造条件を変更して鋳造板を作製、表面割れへの影響を調べた。また、それらを冷間圧延後に熱処理をした T4 材の引張特性を調べた。

試験方法  
鋳造試験は、表 4.4.6 に示すプロジェクトのベース合金である 3%Si 材 (Al-3%Si-1%Fe-0.8%Cu-0.5%Mg) で行った。鋳造は幅 50mm の板を鋳造する縦型高速双ロール鋳造機 (小型実験機) で行った。鋳造機の仕様を表 4.4.7 に、鋳造機の写真を図 4.4.7 に示す。鋳造試験は、表 4.4.8 に示す条件にて実施した。鋳造板の表面割れの評価はカラーチェックと断面観察により行った。また、各鋳造条件で得られた薄板連鋳板を 1mm まで冷間圧延後に熱処理し T4 材を作製、引張試験を行った。1mm 厚さの T4 材作製までの工程を表 4.4.9 に示す。引張試験は圧延平行方向を引張軸とし、評点間距離 25 mm、幅 12.5mm の小型試験片 (図 4.4.8) を用いて行った。

## 結果

鑄造条件を変更した鑄造板のカラーチェックによる表面評価の例を図 4.4.9 に示す。高荷重条件で作製した鑄造板で割れが顕著に見られる。また、各鑄造板の断面観察の結果から評価した表面割れの状況を表 4.4.10 に示す。○は、割れが認められなかったもの、△は表面から長さ 200 $\mu$ m 以下の割れが見られたもの、×は明瞭な割れが見られたものである。高荷重条件で割れが顕著に見られ、低荷重、ロールとの接触時間が短い（ロール周速が速く、凝固距離が短い）条件で、割れない表面が得られる傾向が得られた。

厚さ 1mm の T4 材の引張試験より最大伸びが得られた試験での機械的特性を図 4.4.10 に示す。また、各条件の最大伸びを整理した結果を表 4.4.11 に示す。中間目標値である引張強さ 250MPa、伸び 24%を上回る引張強さ 310MPa、伸び 24.7%を達成した。図 4.4.11 に低荷重条件、高荷重条件それぞれで鑄造した板から作製した T4 材の応力—ひずみ曲線とそれらの引張試験片の外観を示す。伸びが低い高荷重条件で作製した鑄造板から作製した試料では加工硬化の途中で破断が発生、試験片表面には割れ欠陥が多く見られた。これらの結果から、低い荷重条件で鑄造するのが良いと考えられる。

## 試験条件

合金組成：

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
組成	3.0	1.0	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.

鑄造：

表 4.4.7 鑄造機の仕様と鑄造条件

ロール寸法	直径：300mm 幅：50mm
ロール材質	銅
ロール周速 (m/min.)	20-80
凝固距離 (mm)	60、100、150
ロール荷重 (バネ) (N/mm)	2 ~ 420
ロール冷却	無し



図 4.4.7 縦型双ロール鑄造機 (板幅 50mm)

表 4.4.8 鑄造条件と試験材記号

30	150	E-1	E-2				
30	100	C-1			C-2		C-3
60	150	F-1					F-2
30	60	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
60	100	D-1			D-2		D-3
60	60	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
ロール周速 (m/min.)	凝固距離 (mm)	5	20	50	100	210	420
		ロール荷重 (N/mm)					

表 4.4.9 鋳造以後、T4 材作製までの工程

項目	諸元
熱処理 (焼きなまし)	380℃× 4 時間
冷間圧延	3mm → 1mm まで
熱処理	硝石炉 530℃ 30Sec → 水冷 → レベラー矯正 → 80℃× 5 h
評価	引張試験

引張試験

形状 GL=25.0、W=12.5mm

引張試験片方向 圧延平行方向

クロスヘッド速度 10mm/分

図 4.4.8 引張試験条件と試験片形状

結果

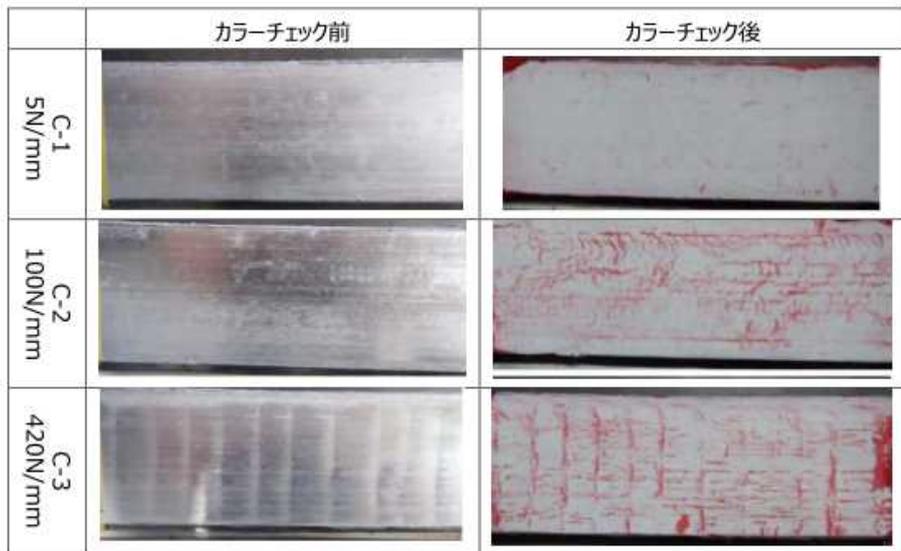


図 4.4.9 鋳造板表面カラーチェックによる割れ評価

表 4.4.10 断面観察による表面割れ評価結果

30	150	△	×				
30	100	○			△		△
60	150	○					△
30	60	△	△	×	×	△	×
60	100	○			×		×
60	60	○	△	○	○	△	×
ロール周速 (m/min.)	凝固距離 (mm)	5	20	50	100	210	420
		ロール荷重 (N/mm)					

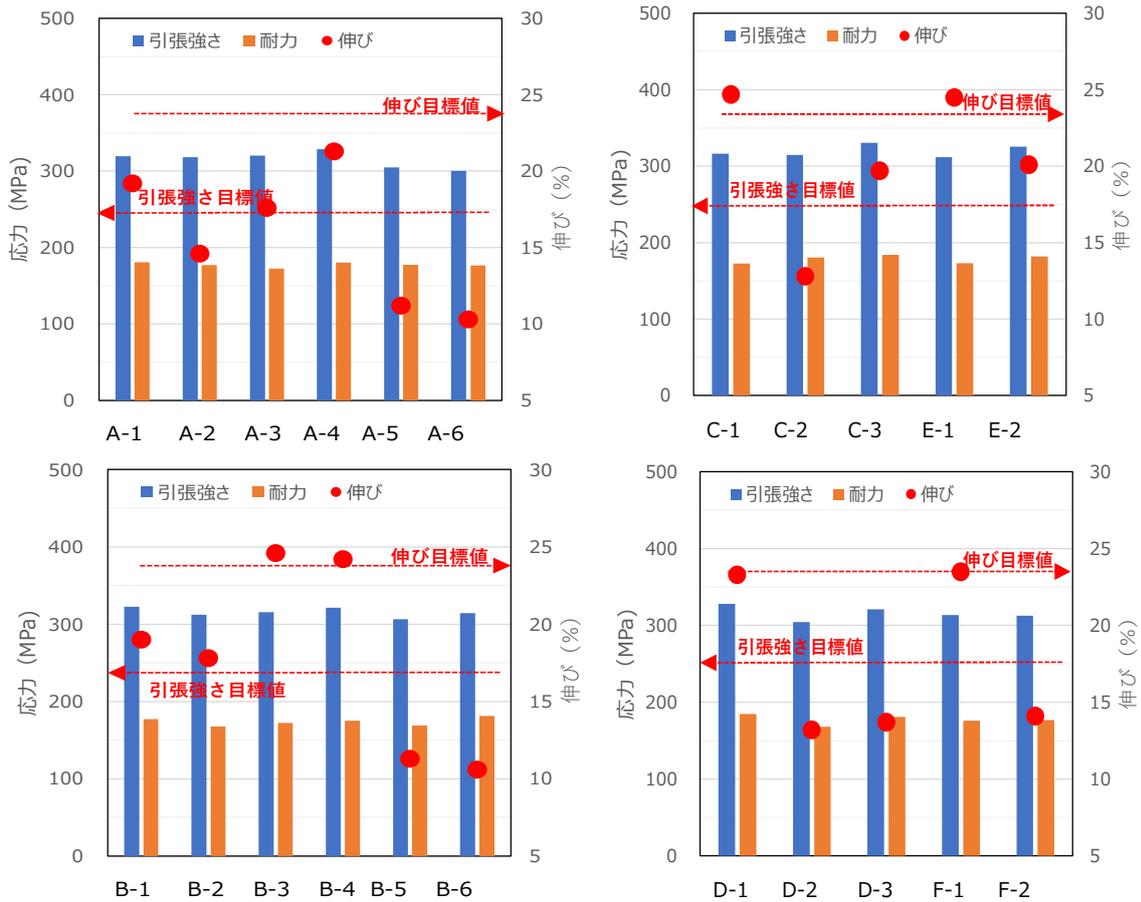


図 4.4.10 各条件で作製した鋳造板から作製した T4 材の機械的特性

表 4.4.11 各試験条件での最大伸び

30	150	24.5	20.1				
30	100	24.7			12.8		19.7
60	150	23.5					14.1
30	60	19.2	14.6	17.6	21.3	11.2	10.3
60	100	23.3			13.2		13.7
60	60	19.0	17.8	24.6	24.2	11.3	10.6
ロール周速 (m/min.)	凝固距離 (mm)	5	20	50	100	210	420
		ロール荷重 (N/mm)					

C1-3 ロール荷重 5N/mm ロール周速 30m/min. 凝固距離 30mm  
 C2-2 ロール荷重 100N/mm ロール周速 30m/min. 凝固距離 30mm

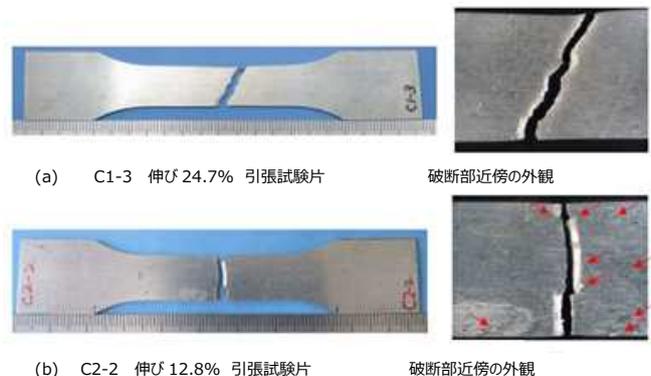
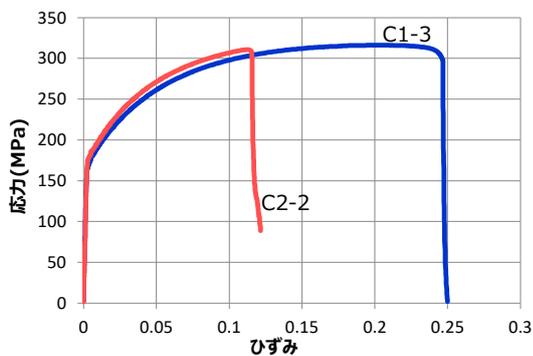


図 4.4.11 各条件で作製した鋳造板から作製した T4 材の応力—ひずみ線図と引張試験の外観

## (2) 鋳造ロール表面模様による改善

ロール表面に溝を付与したロールで鋳造することにより、熱伝達の不均一が改善され、鋳造板の表面不良が改善されると考えられている。鋳造ロール表面に綾目（クロスハッチ）、平目（ロール回転軸に平行方向）のそれぞれの溝を転造加工により付与したロールを作製し、表面割れに及ぼす影響を調べた。

### 試験方法

試験は、小型実験機を使用して、転造により溝をつけた鋳造ロールを用いて鋳造を行った。鋳造条件を表 4.4.12 に示す。表面模様には、綾目、平目の2種類を選び、ローレット山高さなど3条件変更した鋳造ロールを作製した。表 4.4.13 に転造に用いたローレットの仕様を、図 4.4.12 にロール表面の模様を示す。

得られた鋳造板をカラーチェックにより、表面の割れを調べた。また、鋳造板に熱処理を行いO材化した板で絞り成形を行い、絞りカップのコーナー部の割れの状況を観察することによる表面割れを評価した。絞り成形は、φ32mm、絞り比 1.6、しわ抑え荷重 3.4kN で行った。

### 結果

カラーチェックによる表面の評価結果を図 4.4.13 に示す。フラットな鋳造ロールで作製した板では割れが見られたが、溝を付与したロールにより作製した鋳造板では割れが改善された。また絞り試験の結果を図 4.4.14 に示す。通常フラットロールで鋳造した板を成形したカップには割れが見られたが、溝を付与したロールで鋳造した板を成形したカップでは表面割れの改善が認められた。そして、平目模様をつけたロールで作製した板は綾目模様のロールから作製した板よりも割れが抑制される結果が得られた。このことから、平目模様の方が綾目模様よりも割れ抑制効果が優れると考えられる。

表 4.4.12 鋳造機の仕様と鋳造条件

ロール寸法(mm)	直径：フラットロール 300 溝付きロール 250 幅：50
ロール材質	銅
ロール周速 (m/min.)	30
凝固距離 (mm)	100
ロール荷重 (パネ) (N/mm)	20
ロール冷却	無し

表 4.4.13 転造用ローレットの仕様

	P ピッチ (mm)	H 山高さ (mm)
荒目	1.81	0.91
中目	1.27	0.63
細目	0.91	0.47

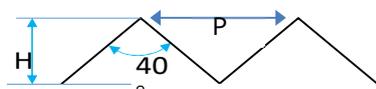


図 4.4.12 溝をつけたロール

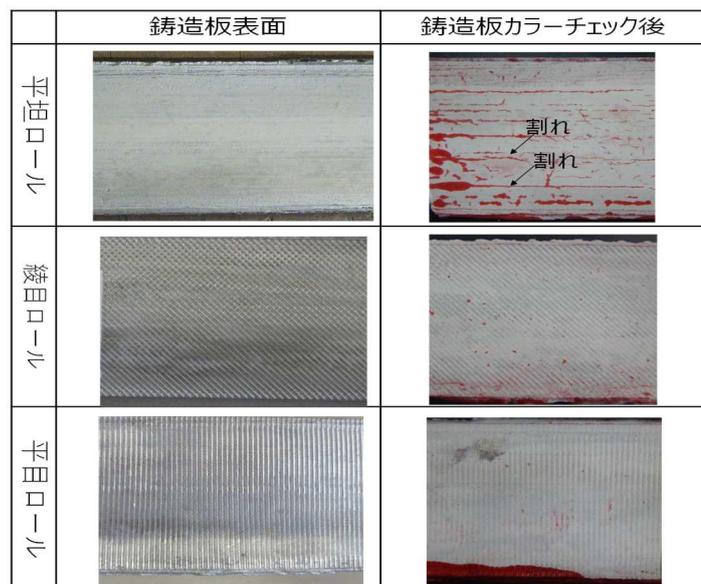


図 4.4.13 溝付きロールにより作製した鋳造板表面のカラーチェック評価

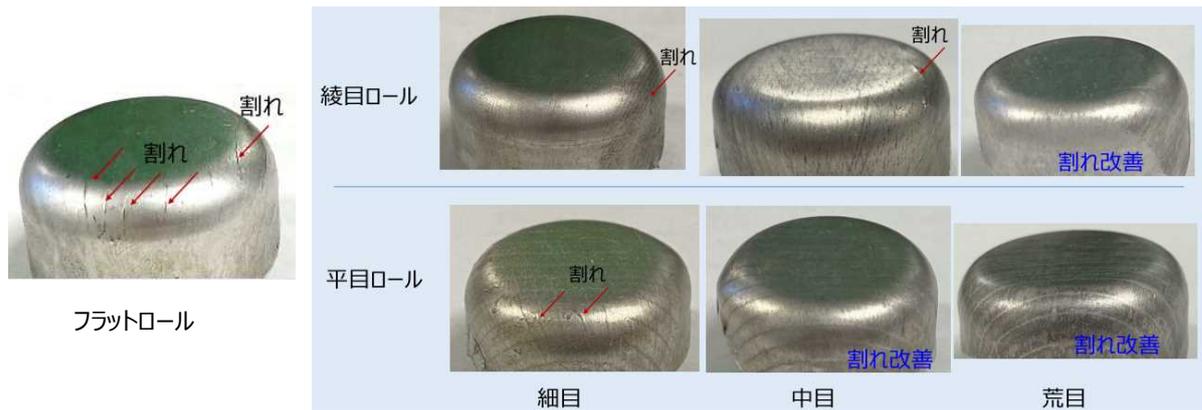


図 4.4.14 溝付きロールにより作製した鋳造板 O 材の深絞り成形による表面割れ評価

### (3) 溶湯ノズル先端形状による改善

縦型高速双ロール鋳造により作製した板の表面には、周期的な筋模様が現れることが知られており、このプロジェクトのモデル合金でも鋳造条件により現れる。周期的な筋模様が発生する要因として、ノズルとロールの接触点近傍における溶湯の振動によるものと考えられており、溶湯の静水圧やロール周速などの鋳造条件の他に、ノズルの形状や熱伝導が影響すると考えられる。そこで、表面品質向上につながるノズル条件の調査検討を行った。

試験は、幅 100mm の板が鋳造できる縦型高速双ロール鋳造機（小型実験機）を使用し、様々なノズル形状で鋳造試験を行い、鋳造板表面の観察、および表面と内部の組織観察を実施した。図 4.4.15 に検討したノズル形状の代表例と、各ノズルにより得られた鋳造板の表面を示す。①通常のノズル形状、②離型剤を塗布したノズルでは、周期的な模様が見られ、離型剤の塗布により白濁部が減少した。③屈折形状では、全面が白濁部であるが、まだらな模様が認められた。④反転ノズルでは、周期模様が消え光沢部が多い板が鋳造された。これは、通常よりも薄い断熱材を使用したことでノズルとロールの接触点近傍における隙間が小さくなり、隙間での溶湯の振動が抑制されたためと考えられる。一方で、④反転ノズルで用いた薄い断熱材は脆く、鋳造中に一部破損していた。このように、ノズルの形状やノズルに用いる断熱材の違いにより、鋳造板表面は大きく変化し、ノズル先端部の寄与がとても大きいことが明らかとなった。これまでの知見から、ノズルに求められる条件として、離型剤の塗布、薄型（ノズルとロールの接触点近傍における隙間を小さくする）、耐久性が重要であり、今後これらを満たすようなノズルを作製し、鋳造板表面への影響を調査する。

#### 各種ノズル形状と鋳造板外観

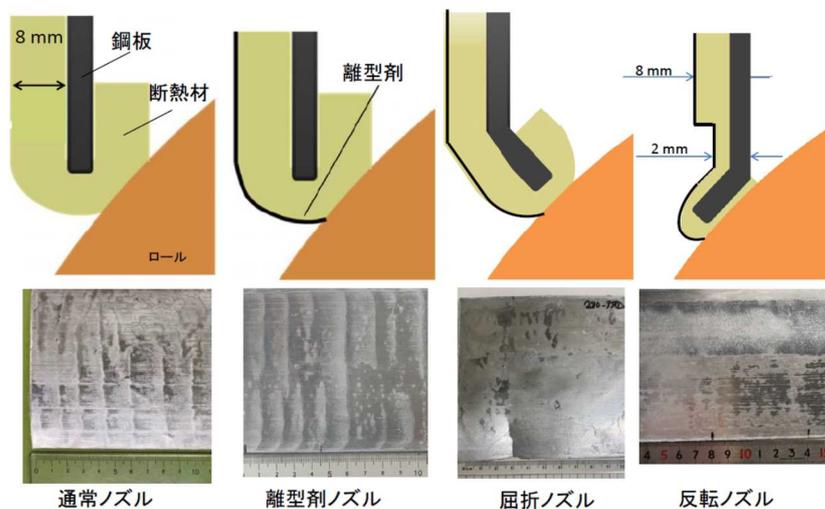


図 4.4.15 検討したノズルの代表例と得られた鋳造板の表面模様

②-1-3 広幅試作材の製造と各種評価（UACJ、神戸製鋼所、本田技研工業、デンソー、東洋製罐 GHD、東洋製罐）

幅 600mm の縦型双ロール鋳造板を、広幅短尺実験機を有する外注で試作した。幅 50mm の小型実験機による鋳造試験結果を受けて、鋳造荷重の低減を進めた。試作材の成分を表 4.4.14 に示す。図 4.4.16 に高荷重で作製した鋳造板と低荷重で作製した鋳造板、それぞれの鋳造板の外観写真と、それらを冷間圧延した後の表面の外観写真を示す。高荷重で作製した鋳造板では、光沢の強い表面が得られるが、拡大して観察すると割れを容易に見つけることができた。一方、低荷重で鋳造した板は光沢の弱い表面が得られ、高荷重で鋳造した板に見られた割れは見つけ難いものであった。低荷重で鋳造することにより、広幅材でも割れが抑制される傾向が認められた。それぞれの板を冷延した結果、高荷重鋳造した板を冷間圧延した板では、板全体に割れが多く見られ、低荷重鋳造した板を冷間圧延した板では、明瞭な割れは認めなかった。

低荷重条件で作製した鋳造板より、T4 材、O 材、H19 材、それぞれを試作し、ユーザーに提供した。それぞれの試作工程を表 4.4.15、および材料特性を表 4.4.16 に示す。また、それぞれの応力—ひずみ曲線を図 4.4.17 に示す。

表 4.4.14 試験材の成分組成 (mass%)

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
組成	3.0	1.0	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.

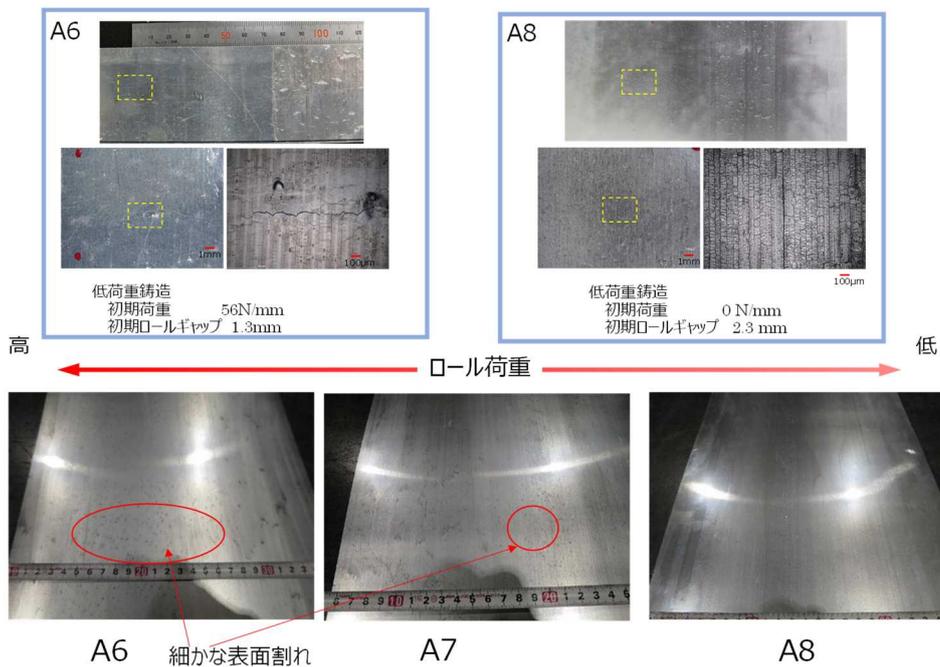


図 4.4.16 鋳造荷重の違いによる鋳造板表面と冷間圧延板表面の違い

表 4.4.15 試作工程

項目	条件		
鑄造板厚	3.4mm		
冷間圧延	↓		2.0
熱処理	360℃×4 h		
冷間圧延	1mm まで冷間圧延		0.3
調質	T4	O	H19
熱処理	硝石炉 530℃×3秒 →水冷 (水冷後レベル矯正)	400℃×2h	
自然時効	1週間		

表 4.4.16 機械的特性

	T4			O			H19		
	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
圧延平行方向	309	166	23.3	187	81	25.1	317	290	2.3
圧延直角方向	288	167	12.0	181	82	18.2	325	297	2.1
AB (平行方向)	348	259	19.5						
備考	n数: As材各5、AB材2 最大伸び材 24.7%			n数 各3 最大伸び 26.8%			n数 各3		

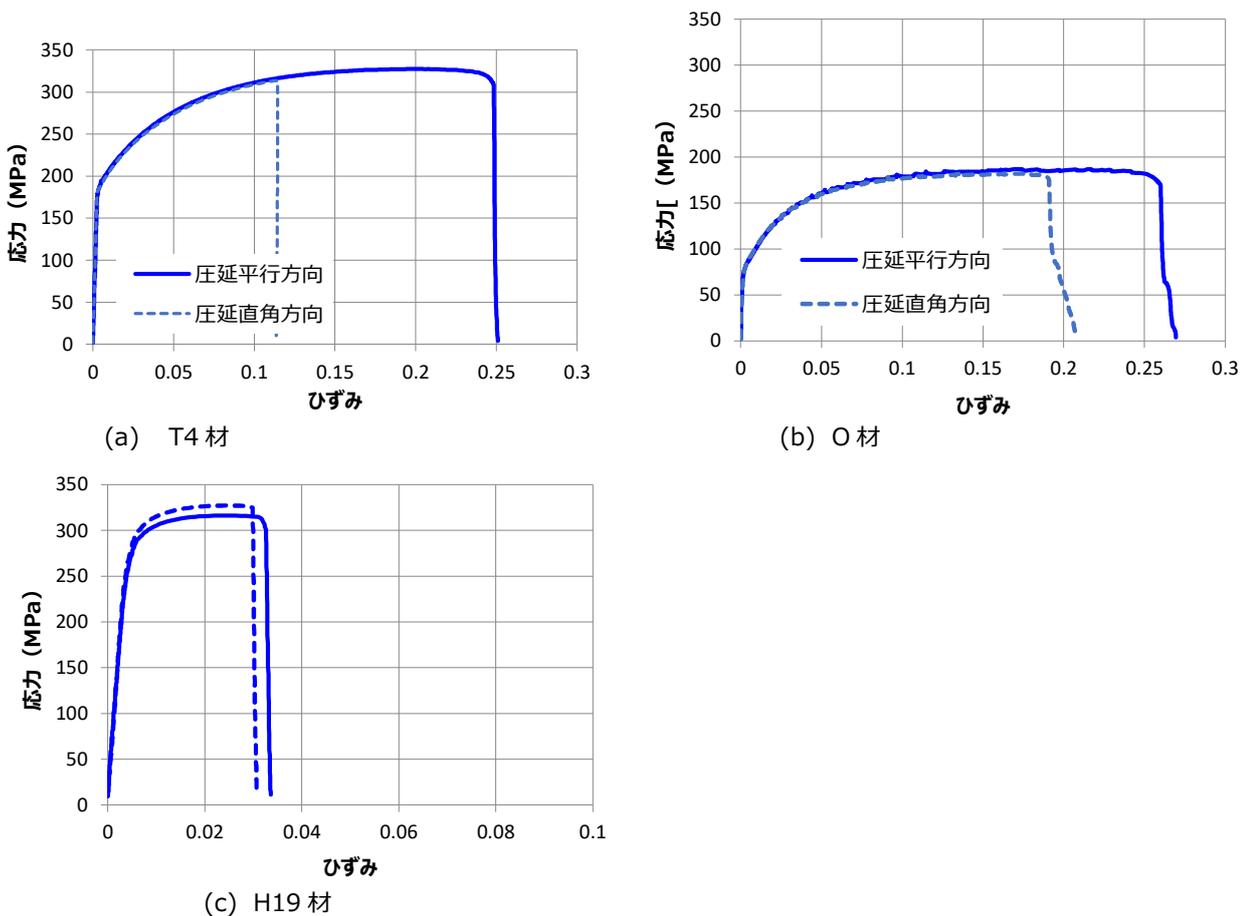


図 4.4.17 応力—ひずみ線図 (a) T4材、(b) o材、(C) H19材

ユーザー企業での評価にはサイズの関係で、縦型高速双ロール鑄造（略称 縦型CC）材は、外注の広幅短尺実験機を使用する。また、比較用として従来法であるDC鑄造、熱間圧延を行った材料もラボで試作した。縦型CC

材は、現在、初期に試作した材料の味見評価の段階で、表面クラック等によって本来の材料特性自体の評価に至っていない。そのため、晶出物は粗大ではあるが、欠陥の少ない DC 鋳造材の方が成形性は上回っているケースが多い。また、調質もまだ最適化していない状況である。従って成形試験はまだ味見段階ではあるが、耐食性試験等は実機を再現出来ていると考えられる。従来材と比較するとリサイクル想定材は晶出物が多いこと等で腐食量が多い傾向にあるが、従来法である DC 鋳造材と縦型 CC 材では腐食挙動が異なっている。図 4.4.18 に ASTM G85A1 腐食試験を実施した際の断面を示す。DC 鋳造材は一般的な孔食形態であるが、縦型 CC 材は中央層に腐食が広がっている。図 4.4.19 にそれぞれの断面の光顕写真、SEM-EDS の Fe と Cu のマッピング写真を示す。DC 材は板厚方向に均一であるのに対し、縦型 CC 材は中央部の晶出物が大きく、徐冷されていると推測される。また中央層の Fe、Cu が少なくなっている。これが腐食形態の差の原因になっている可能性がある。組織と組成の分布はそのメカニズムとともに今後の課題である。

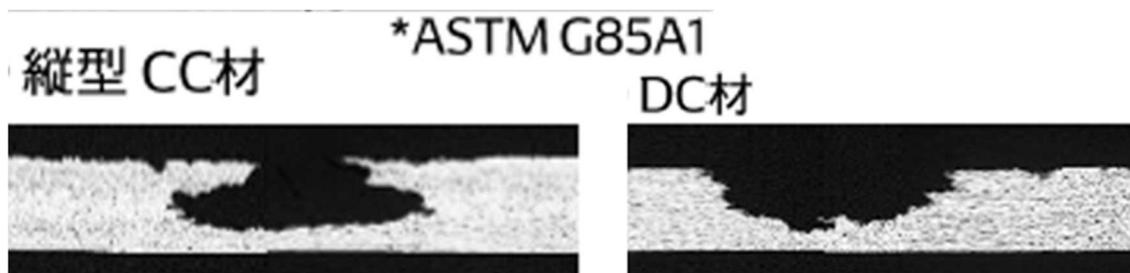


図 4.4.18 縦型 CC 材と DC 材の腐食形態

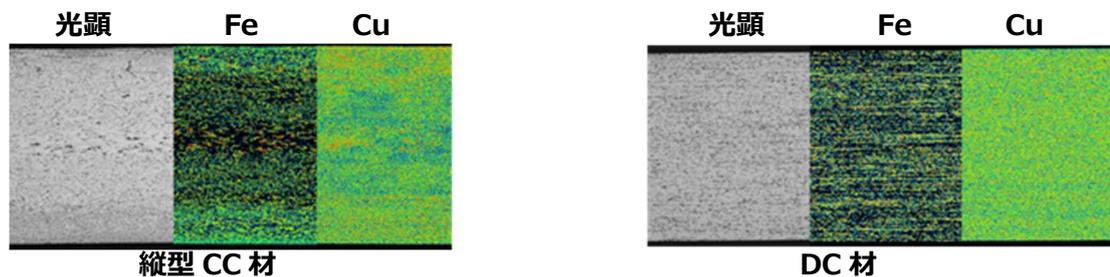


図 4.4.19 縦型 CC 材と DC 材の断面組織と組成分布

## 研究開発成果の詳細 ②-2 加工熱処理による不純物無害化技術

### 研究開発項目②-2-1 (UACJ、九州工業大学)

研究開発項目②-2 では鋳物組成に近いサイクル想定合金を巨大ひずみ加工と熱処理を組み合わせることで、高強度構造部材用材料として使用することを目指している。巨大ひずみ加工としては本研究開発項目②-2-1 では、高圧スライド加工 (HPS) および大型化可能な逐次繰り出し高圧スライド加工 (IF-HPS) を用いた。図 4.4.20 に HPS、図 4.4.21 に IF-HPS の模式図を示す。HPS は上下面から高圧をかけながらスライドさせることで大きなせん断ひずみを与える手法であり、そのひずみ量は板幅に関わらず、板厚とスライド量のみで決定される。従って原理的には板サイズの限界は無いが、サイズが大きくなると圧縮力、スライド力共に増大し、実現が難しくなる。そこで一回のスライドさせる面積を少なくし、それを逐次繰り出すことで大型化を可能としたものが IF-HPS である。図 4.4.22 に IF-HPS 加工を施したサンプルの外観を示す。逐次繰り出し部が明瞭に見えるが、表面状態を反映した模様であり、大きな段差はない。

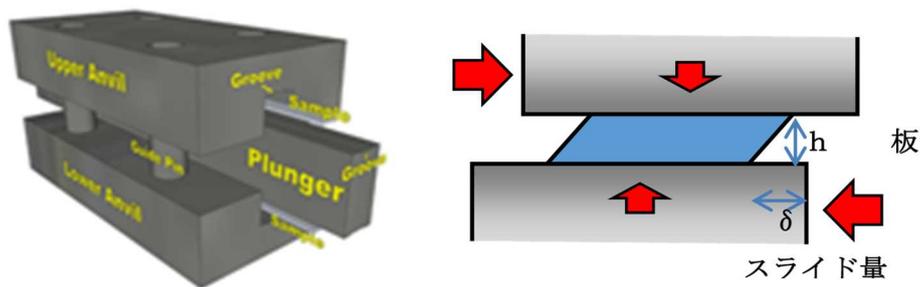


図 4.4.20 HPS の模式図

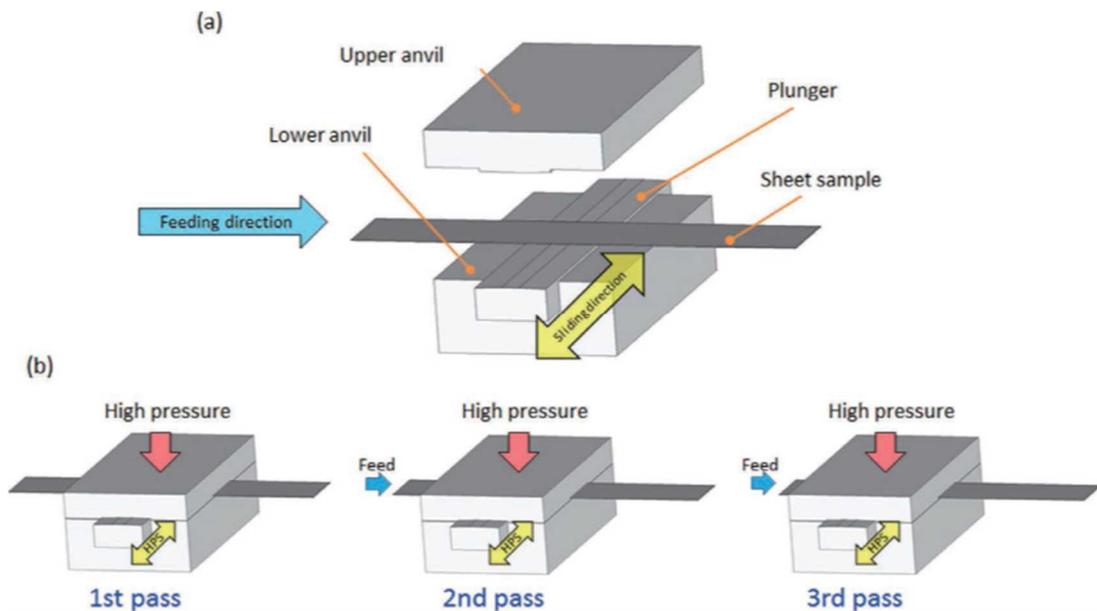


図 4.4.21 IF-HPS の模式図

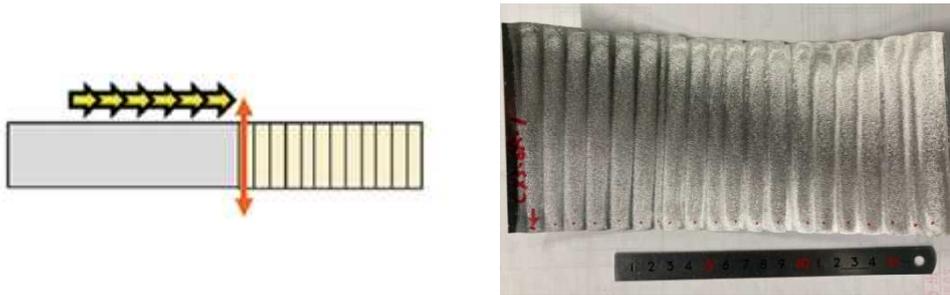


図 4.4.22 IF-HPS で製造した板材外観

#### 調査サンプルの作製条件

研究開発項目②-2 では共通サンプルとして、表 4.4.17 に示す 9 種の組成のアルミニウム合金を作製した。ベース合金はリサイクル原料として、鋳物として使われる ADC12 と展伸材として使われる 6022 の混合物を想定し、それを溶解後、研究開発項目①-1 の不純物低減技術によって精製した際に想定される組成を定めた。残りの 8 種の合金についてはベース合金から Si、Fe、Cu、Mg について、リサイクル合金を作製する際に変動しうる組成の範囲で作製し、各種元素の添加量の影響を調査することとした。ベース合金は、アルミニウムで従来使用されている DC 鋳造で製造したものに、研究開発項目②-1 で実施している広幅短尺実験機を使用した縦型 CC 材の評価を実施した。

表 4.4.17 調査した合金の化学組成

合金名	狙い化学組成 (wt.%)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
ベース合金	3.0	1.0	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 Cuレス	3.0	1.0	<0.01	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 0.4Cu	3.0	1.0	0.4	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 Fe減	3.0	0.5	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 Fe増	3.0	2.0	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 Si減	2.0	1.0	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 Si増	4.0	1.0	0.8	0.2	0.5	0.4	Bal.
ベース合金 Mg減	3.0	1.0	0.8	0.2	0.3	0.4	Bal.
ベース合金 Mg増	3.0	1.0	0.8	0.2	0.8	0.4	Bal.

図 4.4.23 に DC 鋳造で製造した合金について、先述の HPS や ARB とした巨大ひずみ加工に供する前段階となる冷間圧延板の工程を示す。DC 鋳造後、520℃、4h の均質化処理を実施した。均質化処理後の鋳塊を 480℃に加熱し、圧延機に通すことで熱間圧延を実施し、板厚を 30mm から 5mm まで減じた。その後、室温まで冷えた板厚 5mm の板材を圧延機に通して冷間圧延を実施した。HPS に供するものについては、板厚が 0.9mm になるまで圧延し、ARB に供するものに対して板厚が 2.0mm になるまで冷間圧延を行った。

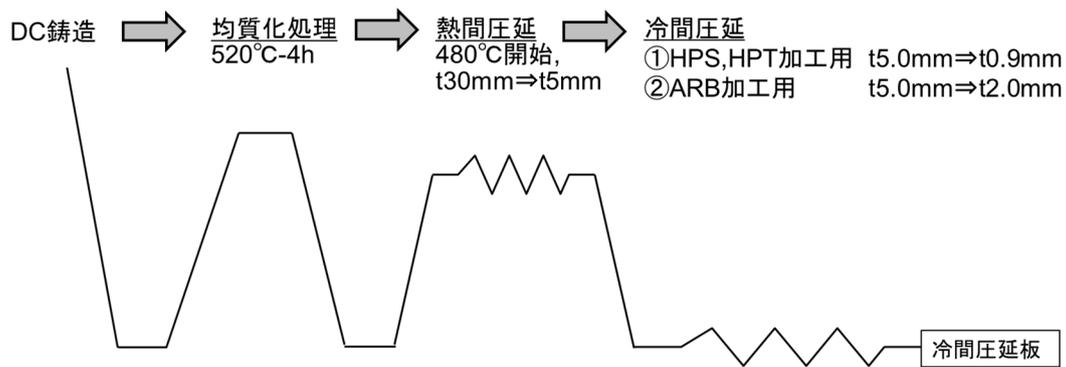


図 4.4.23 DC 鋳造材の冷間圧延板の製造工程

図 4.4.24 に縦型/横型高速双ロール(以降、縦型/横型 CC)で製造した材料の巨大ひずみ加工前の冷間圧延板の製造工程を示す。鋳造のままの段階で縦型 CC は板厚が 3~4mm、横型 CC は板厚が 6mm となっている。また、縦型/横型 CC 材の鋳造での冷却速度が DC 鋳造材と比べて速いことから、各種元素の固溶度が高くなっている。板厚が DC 鋳造材と比べて薄く、また、高い固溶度を維持するため、DC 鋳造材と異なり、均質化処理、熱間圧延は行わずに冷間圧延のみ実施した。冷間圧延後の板厚は DC 材での冷間圧延板と同等とした。

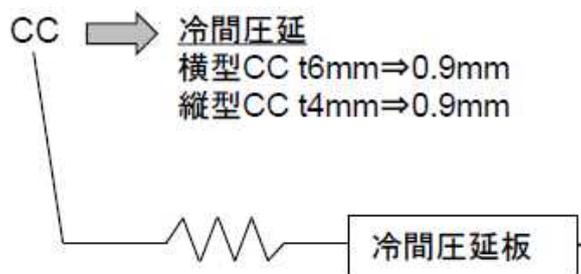


図 4.4.24 CC 鋳造材の冷間圧延板の製造工程

図 4.4.25 に冷間圧延板からの加工熱処理条件を示す。溶体化処理は 540°C、30 分の熱処理後、水冷を標準条件とした。水冷後の材料は室温時効により特性が変わるため、原則冷凍庫にて保管し、材料温度を低温に保った。しかし、HPS、IF-HPS の加工時には材料温度が室温となり、自然時効条件の管理が難しくなることから、水冷後、冷凍庫への保管の前に、7 日間室温におき、自然時効を進めておくことで、HPS、IF-HPS の工程において材料が室温に晒される時間の差による影響を軽減させた。縦型/横型 CC 材は冷却速度が DC 材より速いことから、各種元素の固溶量が多いことが見込まれるので、溶体化処理を行わない条件での HPS 加工も実施した。また各種高ひずみ加工の後に時効処理を行うことでの機械的特性の向上も試みた。

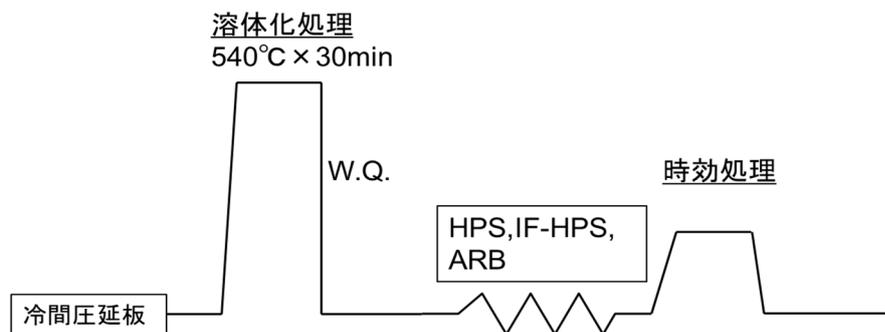


図 4.4.25 冷間圧延後の加工・熱処理条件

## 調査結果

### ②-2-1 IF-HPS を用いた大型化技術

IF-HPS の調査の前段階として HPS 材での機械的特性を調査した。図 4.4.26 に DC 鋳造したベース合金における冷間圧延板、溶体化処理後、HPS でスライド量 5mm とした場合と、スライド量を 15mm とした場合の引張試験の結果を示す。溶体化処理後の材料は水冷後約 7 日後に引張試験を実施し、HPS 材は溶体化処理での水冷後室温時効を 7 日間行ったものに加工を実施した材料で引張試験を実施した。溶体化処理後の状態から HPS のスライド量増加に伴い、耐力、引張強さが上昇し、HPS15mm では引張強度が 635MPa に達した。また、HPS 材は冷間圧延材と比べて強度増大だけでなく延性の増加も見られ、スライド量 15mm の方がスライド量 5mm より強度も伸びも増大した。このように HPS はリサイクル想定組成アルミニウム合金の高強度・高延性化を見込めるプロセスであると考えられた。

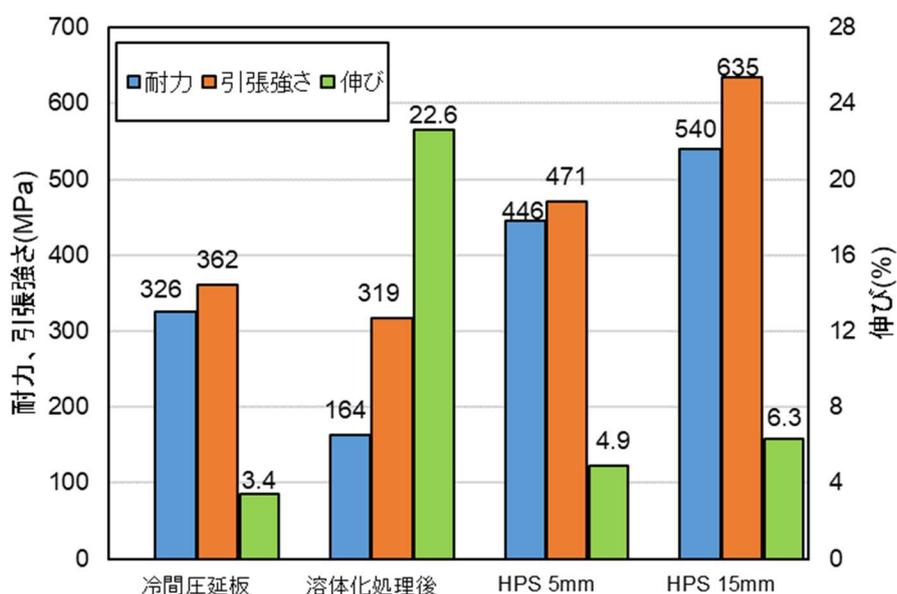


図 4.4.26 ベース合金の各種加工熱処理条件での材料の引張試験の結果

図 4.4.27 に各種合金の HPS15mm の材料の引張試験の結果を示す。いずれの材料も溶体化処理での水冷後室温時効を 7 日行ったものに加工を施した材料で引張試験を実施した。今回調査した合金の中では Cu レス合金の HPS15mm 材での引張試験結果(引張強さ 473MPa、伸び 14%)が中間目標(引張強さ 400MPa、伸び 15%)をほぼ達成した結果となった。

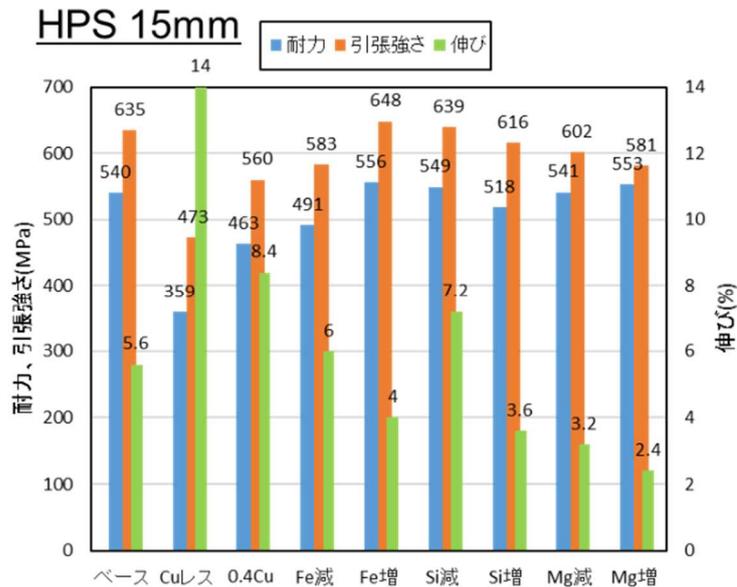


図 4.4.27 各種合金の HPS15mm 材の引張試験結果

図 4.4.28 に縦型/横型 CC で製造したベース合金の HPS15mm 材料の引張試験の結果を DC 鋳造のベース合金と比較して表した結果を示す。縦型 CC、横型 CC の条件ともに、HPS 加工前に溶体化処理を行った材料の方が溶体化処理を行わなかった材料と比べて引張強度が高く、溶体化処理を行った材料はいずれも DC 鋳造の HPS 材と同等の引張強度となった。一方で縦型/横型 CC で製造したベース合金の HPS 材の伸びは、いずれも DC 鋳造のベース合金の HPS 材よりも低くなった。これは CC 材表面の欠陥に由来するものと考えられ、今後、CC 材で欠陥を生じない条件の合金が作製できれば、伸びは DC 鋳造材と同等以上の値になることが期待される。

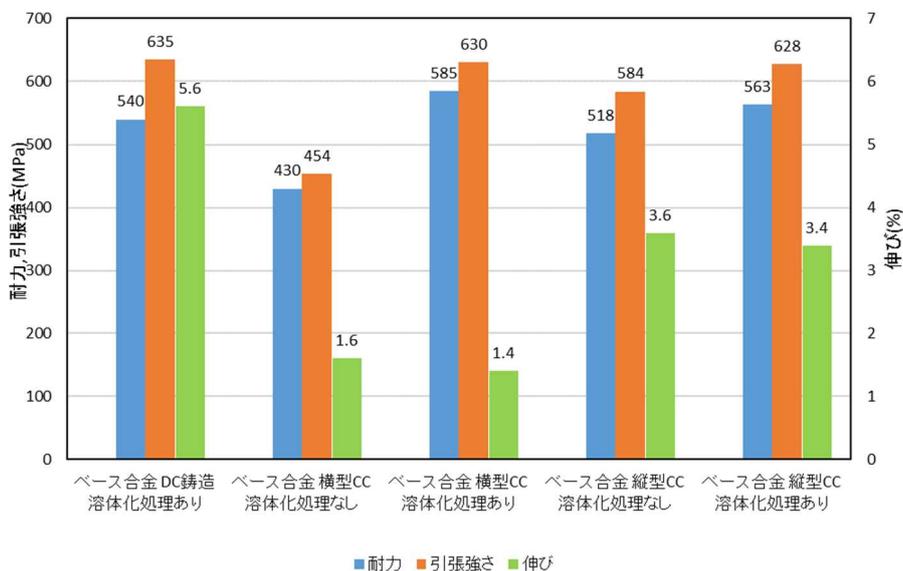


図 4.4.28 DC 鋳造及び縦型/横型 CC のベース合金の HPS 15mm 材の引張試験結果

HPS による材料の高強度・高延性化を確認することができたので、材料の大型化のための IF-HPS での加工を試みた。IF-HPS では材料を逐送する機構のため、加工部と未加工部の境で材料の割れが発生することがあり、大型化達成のために、割れなく加工できる条件探索が必要となる。図 4.4.29 に 15mm-1P の条件で加工したベース合金 (DC 鋳造)、板幅 200mm の IF-HPS サンプルの外観写真を示す。IF-HPS までの条件は HPS 材と同じである。

15mm-1Pとは1か所あたりのHPSを一度に15mmスライドさせた条件で加工したことを意味する。15mm-1Pの条件では材料の端部に割れが多く発生していた。HPS材の場合、材料全体を拘束させて加工させたもののため、割れなく加工できたが、IF-HPSでHPSと同様の条件で加工を実施すると、加工中に拘束されている箇所と拘束されていない箇所とのズレで割れが発生する。図4.4.30に3mm-5Rの条件で加工したベース合金(DC 鋳造)、板幅200mmのIF-HPSサンプルの外観を示す。3mm-5Rとは1か所あたり、片道3mmのスライドを5パス(2往復半)の加工、総スライド量15mmのHPSを行ったことを表す。なお、加工条件のRは往復でスライドを実施したことを意味する。この加工によって材料の加工中に拘束される箇所と拘束されない箇所のズレが小さくなり、割れなく加工することができた。DC 鋳造した合金についてはベース合金以外の合金についても3mm-5Rの条件でIF-HPSを行うことで、割れのない板幅200mmの材料を作製することができた。



図 4.4.29 DC 鋳造したベース合金の IF-HPS 材の外観(加工条件:15mm-1P)



図 4.4.30 DC 鋳造したベース合金の IF-HPS 材の外観(加工条件:3mm-5R)

図 4.4.31 に縦型/横型 CC で製造し、冷間圧延後溶体化処理を行ったベース合金の板幅 200mm の IF-HPS 材の外観写真を示す。DC 鋳造の材料と同じく、3mm-5R の条件で割れなく加工できた。なお、横型 CC の IF-HPS 材で見られる割れは冷間圧延の段階で生じており、IF-HPS で生じたものではない。

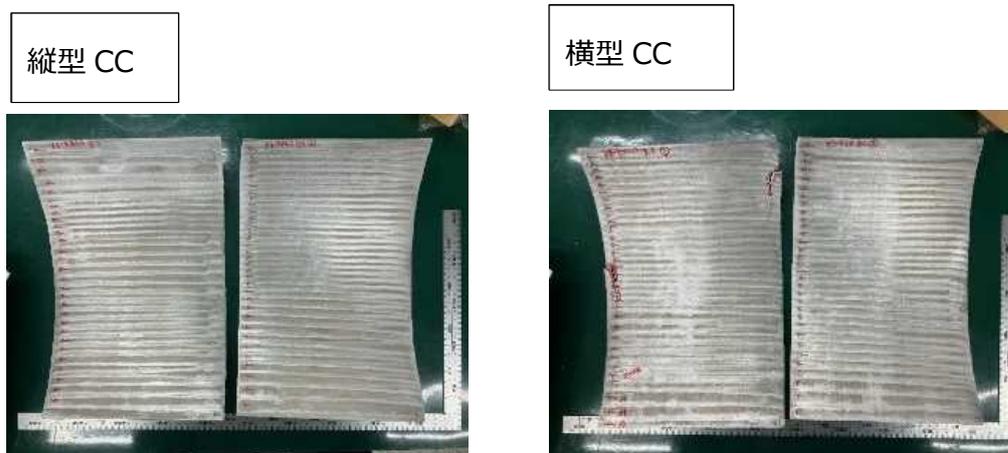


図 4.4.31 縦型/横型 CC で製造したベース合金の IF-HPS 材の外観(加工条件:3mm-5R)

#### ②-2-2 ARB を用いた大型化技術 (UACJ、千葉工業大学)

本研究開発項目②-2-2 では巨大ひずみ加工として繰り返し重ね圧延 (ARB) を用いた。ARB 加工は圧下率 50% で圧延した板を切断、重ね合わせて再度 50% の圧下を加える手法であり、この 1 セットを繰り返すことで、板厚の変化なく巨大ひずみを導入することができる。図 4.4.32 に ARB の模式図を示す。

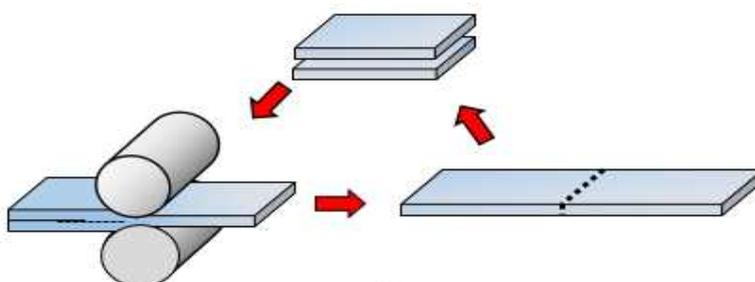


図 4.4.32 ARB の模式図

図 4.4.33 にベース合金の溶体化まま及び溶体化処理直後に時効処理を実施した材料の引張試験の S-S カーブを示す。100℃と 170℃の時効時間はいずれも、予備実験として行ったビッカース硬さ試験で最も高い硬さを示した時効時間とした。人工時効によって引張強度は上昇し、また、時効温度 170℃の方が 100℃と比べて引張強度が高くなる一方、引張強度の高い材料の方が伸びは低くなる傾向にあった。170℃、5 時間時効した材料は引張強さ 399MPa、伸び 17%となり、中間目標(引張強さ 400MPa、伸び 15%)をほぼ達成した特性を得られた。

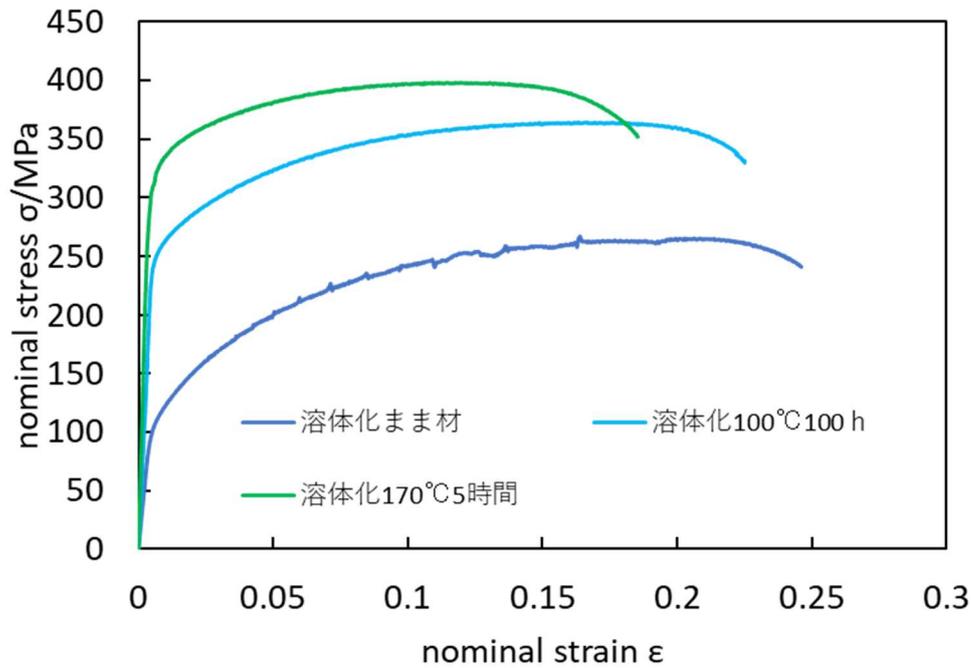


図 4.4.33 ベース合金の溶体化まま及び時効処理後の材料の応力ひずみ曲線

図 4.4.34 にベース合金について最適な加工熱処理条件を探索するため、さらに様々な条件で作製した板材の引張試験結果を、縦軸に引張強さ、横軸に伸びとしてプロットしたものを示す。ARB はいずれも 1 パス(冷間圧延率 50%)であった。また、自然時効は 7 日間もしくはなしで行った。強度と伸びのプロットでまとめると、概ね強度・伸びがトレードオフの関係になっており、その中では、前述した溶体化処理を行った直後に 170℃、5 時間の人工時効を行ったベース合金が最も目標達成に近く、引張強さ 399MPa、伸び 17%であった。効果発現のために必要な ARB は 1 パスで十分であり、熱処理条件によっては ARB なしでも効果を発現することを確認した。

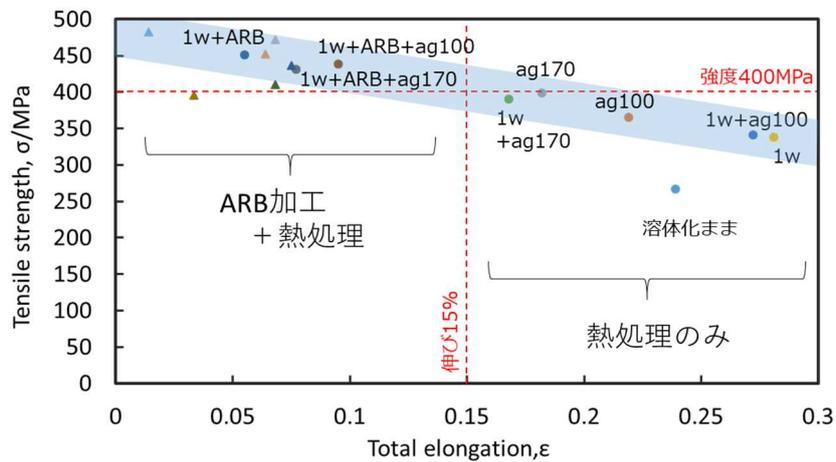
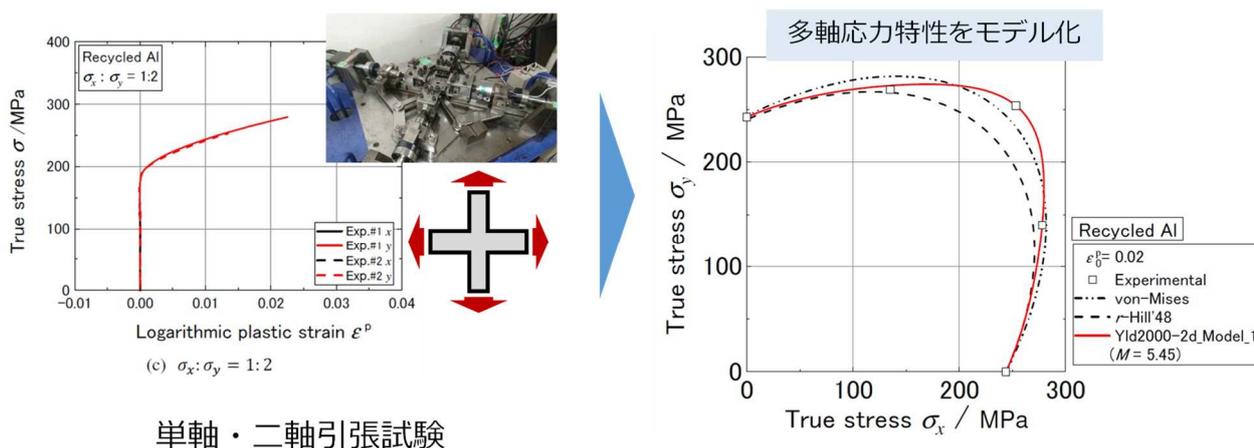


図 4.4.34 ベース合金の各種加工熱処理条件での引張強さと伸びの相関

## 研究開発成果の詳細 ②-3 計算科学による再生アルミニウム材の高精度成形性予測技術

Si や Fe などの不純物元素を多量に含み、かつ、縦型高速双ロール鋳造など既存材とは大きく異なる組成、製法で生産される再生アルミニウム材は、強度や延性、変形挙動の異方性などの特性が大きく異なる。このような素材のプレス成形性を正確に予測するには、素材の変形挙動を高精度に再現するための数学モデル（以下、材料モデル）の確立が必須となる。中でも、素材の多軸応力特性を表現する材料モデル（以下、降伏関数）は、プレス成形における応力・ひずみの予測に多大な影響を及ぼす重要な要素である。

プレス成形シミュレーションに広く使用されている降伏関数としては、古典的な Hill'48 式が知られているが、特にアルミニウム材の多軸応力特性の再現精度が低いことが知られている。Hill'48 に代わる高次降伏関数として提案された Yld2000-2d は、アルミニウム材の特性の再現精度が高いとされているものの、関数パラメータを同定するためには、素材の多軸応力状態を測定する必要がある。当チームは、テーマ②-1 で試作されたモデル再生合金材の多軸応力特性を採取するため、一般的な単軸引張試験に加え、十字引張試験片を用いた二軸引張試験を行った（図 4.4.35）。モデル再生合金材は、延性の面でばらつきが見られたものの、その他耐力や加工硬化特性などの試験結果ばらつきは小さく、安定した多軸応力特性が採取できたと考える。採取した多軸応力特性を元に、各降伏関数（von-Mises、Hill'48、Yld2000-2d）のパラメータを同定したところ、Yld2000-2d は、実験により得た等塑性仕事面の応力点を最も精度良く再現できていることが確認できた。



単軸・二軸引張試験

図 4.4.35 単軸、二軸引張試験による、モデル合金材の多軸応力特性採取とモデル化

上記の単軸引張試験、二軸引張試験を通じて構築した高精度材料モデルの妥当性を検証するため、実際のプレス成形と成形シミュレーションの比較を行う。取組の一つとして、素材の穴広げ成形試験を行い、穴縁のひずみを比較対象とすることを計画している。現在、事前評価として、既存合金である A5083-O 材を対象に、穴広げ成形の実機試験とシミュレーションを行い、高精度材料モデルの適用効果検証を行った（図 4.4.36）。シミュレーション結果を比較すると、古典的な Hill'48 降伏関数を用いたシミュレーションより、高次降伏関数である Yld2000-2d を用いたシミュレーションの方が、実機で発生した穴縁の最大主ひずみをよく再現できており、予測精度が高いことが確認できる。今後、モデル再生合金材に対しても同様の評価を行い、高次降伏関数適用によるプレス成形シミュレーションの予測精度改善効果が、再生アルミニウム材に対しても得られることを確認する。

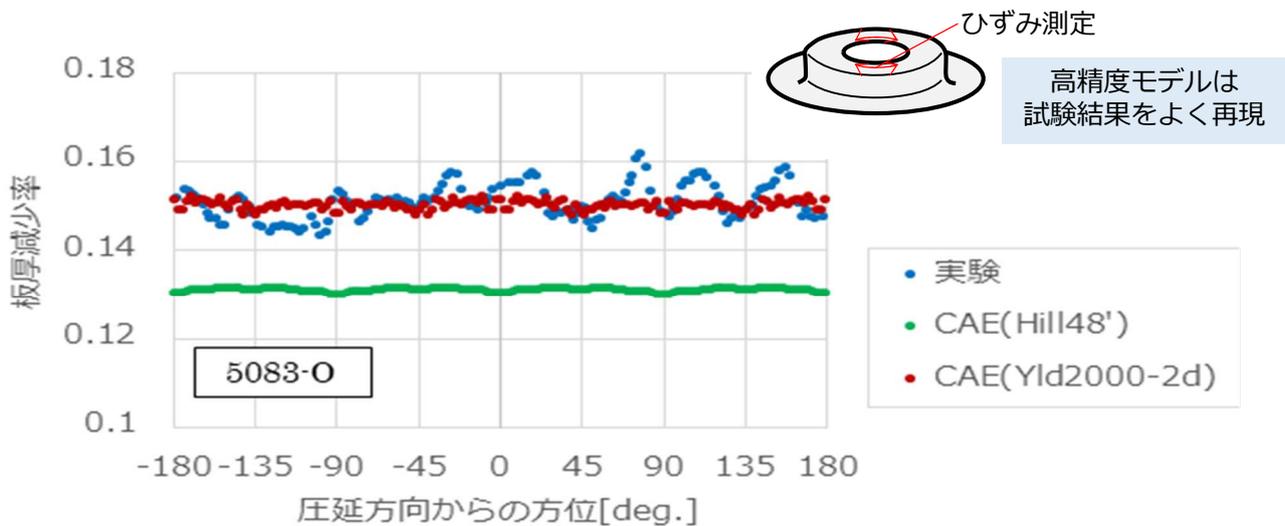


図 4.4.36 A5083-O 材の穴広げ成形 実機試験とシミュレーションの穴縁ひずみ比較

金属材料の多軸応力特性を採取する手法として、上記の十字引張試験片を用いた二軸引張試験は、ISO や JIS として規格化されていることもあり、最もよく知られた試験法である。一方で、試験を実施するには専用の二軸引張試験機を必要とするなど、単軸引張試験と比べて実施コストが高いことが難点とされ、産業界のプレス成形シミュレーションの現場では、まだ十分に普及していない。より簡便に多軸応力特性を採取する手法として、液圧バルジ成形試験と平面ひずみ引張試験を組み合わせた「外接多角形による降伏関数簡易同定法」が提案されており、これを再生アルミニウム材の評価に適用することを計画している。

この手法の課題として、平面ひずみ引張試験で採取できる荷重特性が不安定であること、また、採取可能なひずみ範囲が狭いことが挙げられる。平面ひずみ引張試験は、試験片の幅方向変形を拘束した状態で引っ張るために、引張試験片の寸法は、幅広かつ引張方向長さを短く設定している。そして、試験片の変形をチャック間に集中させるため、試験片のチャック掴み部に補強板を接着剤で貼り付ける。しかし、試験途中で接着剤の剥がれが生じるため、試験荷重が不安定になり、また、素材の破断強度に達する前に接着剤が完全にはがれて試験が終了してしまう。再生アルミニウム材は既存の自動車パネル材より強度が高いため、この問題は更に深刻である。

この問題を解決するため、試験片チャック掴み部を補強するのではなく、試験片変形部の板厚を減肉させて弱体化させる手法を検討した。試験片中央の表層片面に切削加工を施し、板厚を半分にした状態で、引張試験を行った。その結果、従来の接着剤を貼り付けた条件と比べ、試験荷重を安定的に測定できるようになり、また、従来法より大ひずみ域の特性を採取できるようになった（図 4.4.37）。今後、当試験法で採取したモデル再生合金材の多軸応力特性で材料モデルを構築し、成形シミュレーション予測精度の改善効果を検証する。

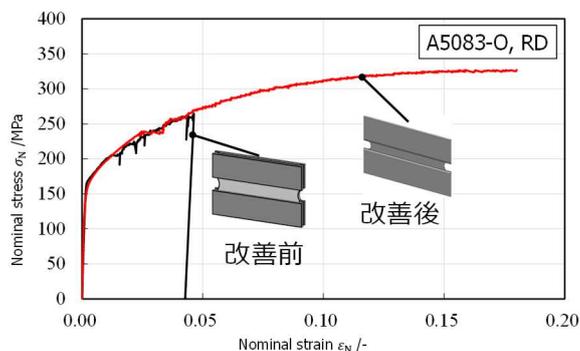


図 4.4.37 平面ひずみ引張試験 荷重－変位関係

再生アルミニウム材の適用評価を行うにあたり、その事前検討として、既存合金である A5083-O 材を対象に絞り成形（絞り比 1.89）および再絞り成形（絞り比 1.38）を実施した。また、板厚および調質は異なるものの、現行品との比較のため、アルミニウム缶の缶胴材である A3004-H12 材の成形も行った。

絞り成形したカップに大きな耳は生じておらず、r 値の周方向のばらつきが小さいことが示唆された。絞り成形中の最大パンチ荷重は缶胴材の倍程度であった（図 4.4.38）。次工程の再絞り成形では、加工後期にパンチ肩 R で底抜けが発生し成形することができなかった（図 4.4.39）。原因調査のため絞りカップ断面のビッカース硬さを測定し、加工硬化性を比較したところ、O 材は元板に対しフランジ近傍の側壁硬さが大きく上昇し加工硬化していることが分かった（図 4.4.40）。以上より、缶胴成形のような多工程成形では材料の加工硬化性が成形性に影響するため、再生アルミニウム材では適切な調質の元、評価を実施する。

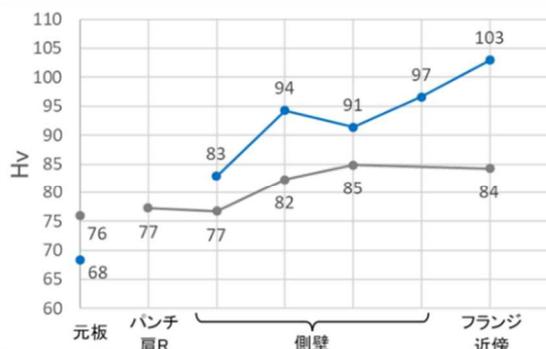
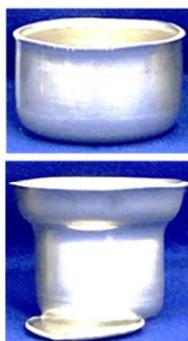
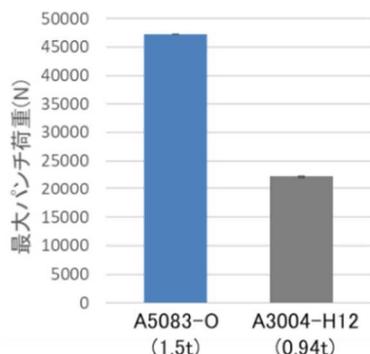


図 4.4.38 絞り荷重

図 4.4.39 絞り・再絞り結果(A5083)

図 4.4.40 絞りカップ硬さ分布

再生アルミニウム材の組織制御とそれによるプレス加工特性の改善のためには、再生アルミニウム材の組織と基礎力学特性の関係を迅速に予測できる技術が必要である。そこで本研究では、二軸引張試験の実験結果や数値シミュレーション（結晶塑性有限要素法）を用いたバーチャル二軸引張試験の計算結果を訓練データとする深層学習技術を用いる。これにより、再生アルミニウム材の組織情報から基礎力学特性や材料モデルを高速推定するシステムを開発することを目標とする。さらに、このシステムのアウトプットとして得られる材料モデルを用いた成形シミュレーションを行うことで、再生アルミニウム材の内部にどのような組織を作り込めば、所望のプレス加工特性を実現できるのかを示唆できる材料設計支援システムの開発を目指している。

現時点で、当初計画通り、既存展伸材である A5083-O 材を対象に上記システムの開発を行っている。はじめに、当該合金の集合組織（結晶方位）を測定（図 4.4.41 左）し、それを入力データとするバーチャル二軸引張試験を実施（図 4.4.41 中央）した。その結果、上記の二軸引張試験で得られた応力-ひずみ曲線や等塑性性仕事面（降伏曲面とみなせる）を概ね再現することを示した（図 4.4.41 右）。このように精度検証されたバーチャル二軸引張試験を、様々な集合組織を持つアルミニウム合金（仮想的なアルミニウム合金）に対して実施することで、ニューラルネットワークを用いた深層学習のための訓練データを蓄積した。さらに、その訓練データを A5182-O アルミニウム合金について学習したニューラルネットワークに転移学習することで、A5083-O 材にも対応できる深層学習モデルを構築した。

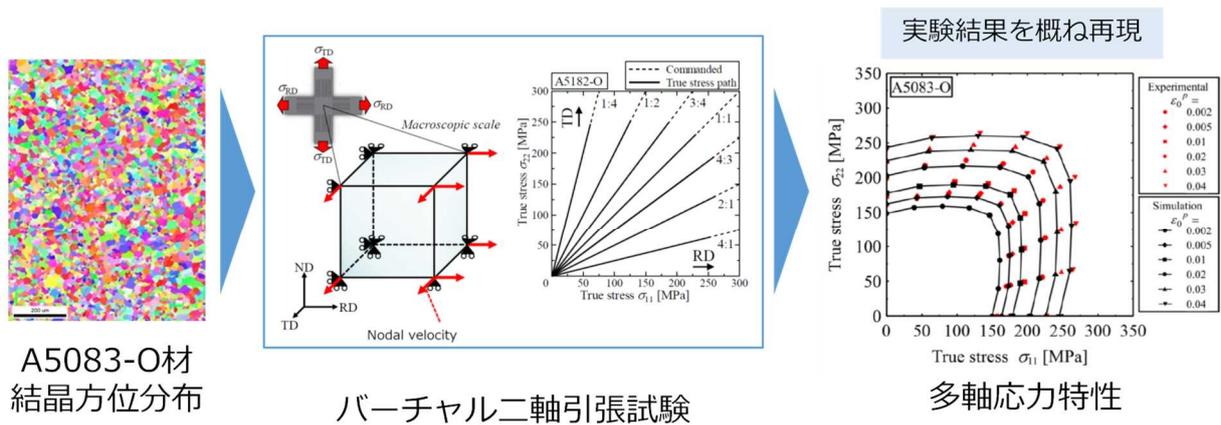


図 4.4.41 バーチャル二軸引張試験による素材の多軸応力特性の推定

板成形シミュレーションを高精度に実施する上で、アルミニウム材の塑性変形特性を精密に測定し、再現することが肝要である。本研究では、あらゆるプレス成形の予測において重要となる塑性異方性、プレス成形後のスプリングバックの予測に重大な影響を及ぼすバウシング効果、多段階のプレス成形において重要となる交差効果を測定する技術を開発した。これら種々の負荷における塑性変形特性を取得するために、単軸引張試験、二軸応力試験、単純せん断試験、単純せん断を利用した反転負荷試験、単軸引張と単純せん断を組み合わせた交差負荷試験の実験手法を構築した。現在までは事前評価として既存の A5083-O 材を対象として実験手法の検証を行った。

単軸引張、単純せん断試験を圧延方向から 0、45、90 度方向に実施して、流動応力および  $r$  値を測定することで板材が有する強度および変形の異方性を測定した。また、二軸応力試験を行って複合応力状態の強度の変形の異方性も測定した。これらの実験で測定した塑性変形特性はプレス加工シミュレーション全般の精度向上に役立つ。次に、図 4.4.42 (左) に示すようにせん断試験の途中で負荷方向(せん断の方向)を逆転させる反転負荷試験を実施した。反転負荷を与えることで再降伏後の流動応力は最大で 10%程度低下し、その後の変形が進行するに伴って、単調負荷の応力ひずみ曲線に漸近した。反転負荷するひずみ量が大きくなるほど、再降伏応力の低下は減少した。このように本供試材のバウシング効果を定量的に明らかにした。図 4.4.42 (右) には、単軸引張の後に単純せん断を与える交差負荷の応力-ひずみ曲線を示す。負荷経路が変化した後に流動応力が 2~4%上昇し、その後、流動応力は単調負荷の結果より一定量上昇したまま変形が進んだ。このように負荷経路が変化する際の交差効果を定量的に明らかにした。

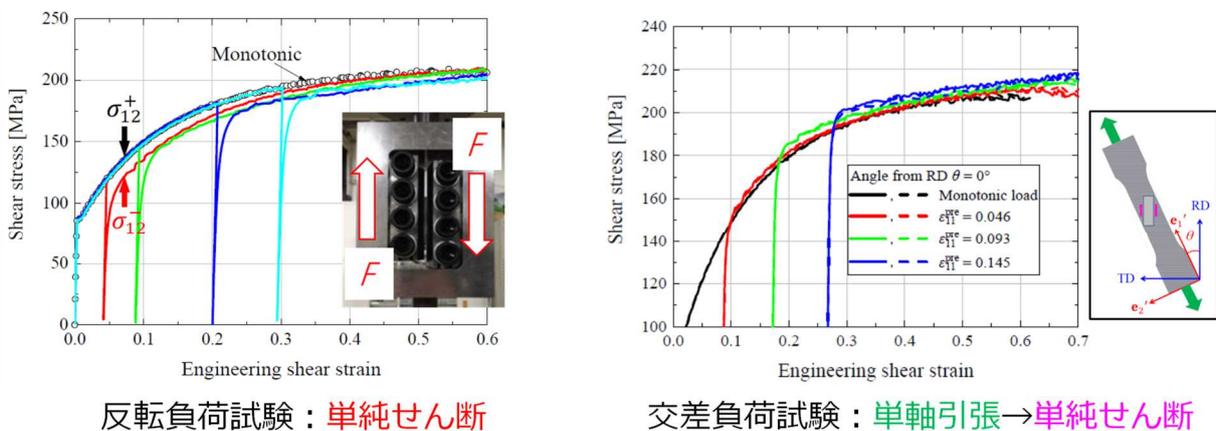


図 4.4.42 A5083-O 材の反転負荷試験、交差負荷試験結果

**研究開発成果の詳細 ②-4 LCA・戦略策定支援（エイゾス、東京大学、国立環境研究所、総合地球環境学研究所）**

研究開発項目②-4 では、各研究開発項目のチームと連携して、再生アルミニウム材の環境影響を推計するとともに、AI 解析を実施する。また、得られた成果を各チームにフィードバックすることで、他の研究開発項目の研究開発を支援することを目的とする。具体的な研究内容として、再生アルミニウム材 1 kg あたりの環境影響を評価する LCA 評価、再生アルミニウム材の将来需要推計、製造条件を最適化するための AI 解析を実施する（図 4.4.43）。

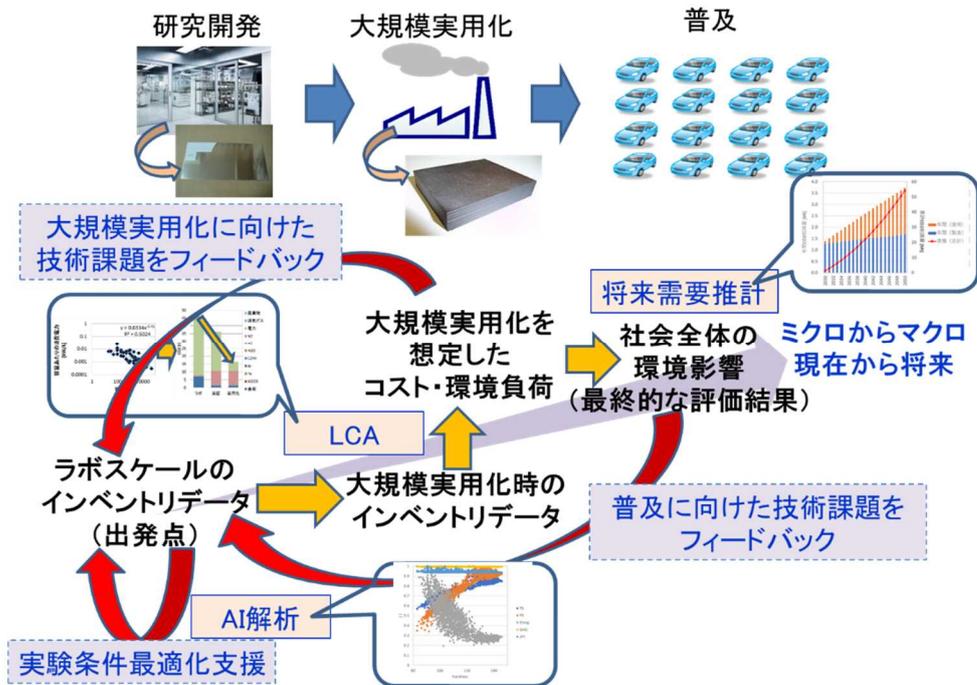


図 4.4.43 LCA・戦略策定支援の概要

LCA 評価については、ラボスケールのインベントリデータをもとに、大規模実用化時のコスト・環境負荷の推計を行うとともに、手法の精緻化や結果のレビューを行い、解析精度を向上させた（図 4.4.44）。現在は、実証スケールのインベントリデータを元に大規模実用化時のコスト・環境負荷の推計を行うため、電磁攪拌および縦型高速双ロール鋳造の実証スケールのインベントリデータを収集している。

また、従来の LCA 評価では、各プロセスの実験条件における一つのモデルケースを元に解析を行うが、後述する AI 解析との連携（図 4.4.45 参照）を行うために、加工熱処理プロセス（HPS）のラボスケールの個々の実験データを元に、大規模実用化時のコスト・環境負荷を推計するための手法を開発し、AI 解析との連携を図った。

今後は、得られた電磁攪拌、縦型高速双ロール鋳造の実証スケールのインベントリデータを元に、大規模実用化時のコスト・環境負荷を推計する。

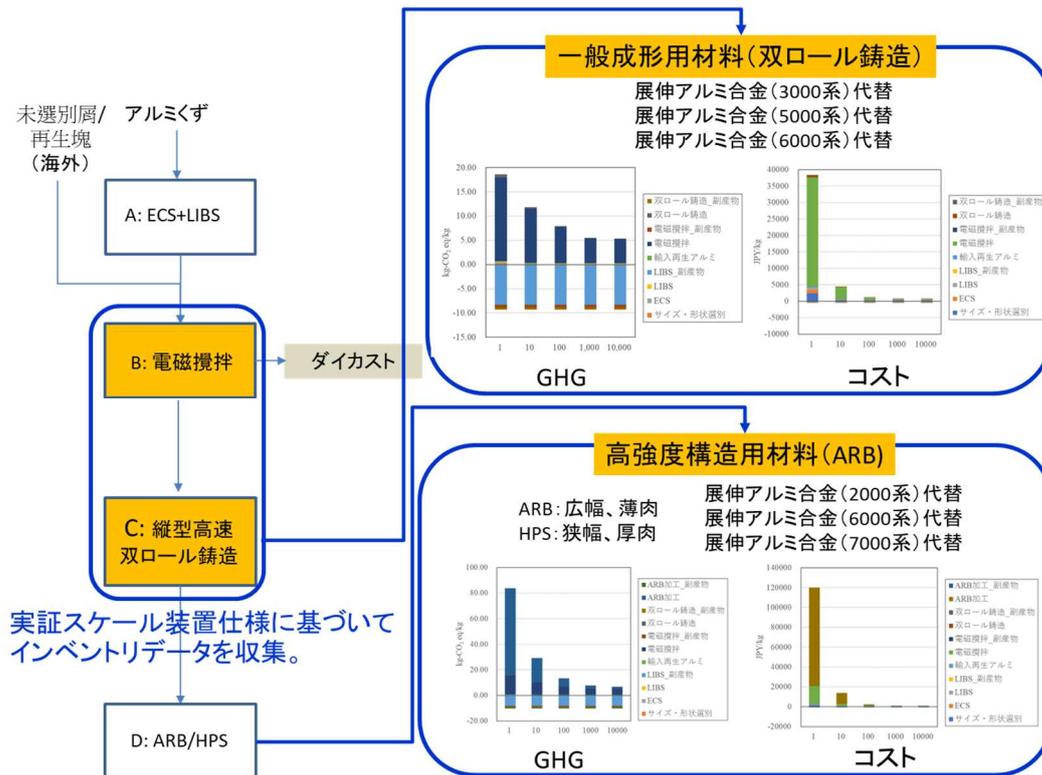


図 4.4.44 LCA 評価結果

AI 解析については、加工熱処理プロセス（HPS）の実験データを元に、不純物濃度（Si、Fe、Mg）、高圧スライド加工のスライド量、時効熱処理の温度と時間の 6 つの説明変数を Input、強度、TS、PS、延性の 4 つの目的変数と、実験条件から推計された大規模実用化時の GHG・コストの 2 つの目的変数の合計 6 つの目的変数を Output として、ニューラルネットワークで学習し、要因分析を行うとともに、強度、TS、PS、延性を最大化し、かつ GHG とコストを最小化する説明変数の条件を探索した（図 4.4.45）。探索された条件では、強度、TS、PS は同時に最大化可能であるが、延性は前述の 3 項目とトレードオフの関係にあり、延性を増加すると、強度、TS、PS が減少することが明らかになった。また、GHG とコストは、与えられた実験条件の範囲においてはほぼ変化しないため、GHG とコストについては条件を探索する必要がないことが明らかになった。この原因は、GHG とコストは、溶体化処理における温度や時間の影響が大きいものの、今回の実験では溶体化処理の温度と時間が一定であったため、Input から除外されたためである（図 4.4.45 のグレー領域）。今回の試算では、延性 15%以上を達成するためには、TS の最大値の約 8 割程度の 370MPa に抑える必要があることが明らかになった。

現在、電磁攪拌の実験データを収集しており、今後は、HPS と同様の解析作業を実行できるよう、スケールアップ解析と LCA 評価、AI 解析を実施する予定である。また、高速縦型双ロール鋳造に関するデータの収集についても検討を進めていく予定である。

		項目名	単位
実験条件 (インプット)	不純物濃度	Si	%
		Fe	%
		Mg	%
	溶体化処理	Temp.	°C
		Time	min
	高圧スライド加工	Pressure	GPa
		Length	mm
	時効処理	Temp.	°C
Time		min	
実験結果 (アウトプット)	Hardness	Hv	
	TS	MPa	
	PS(0.2%)	MPa	
	Elong.	-	

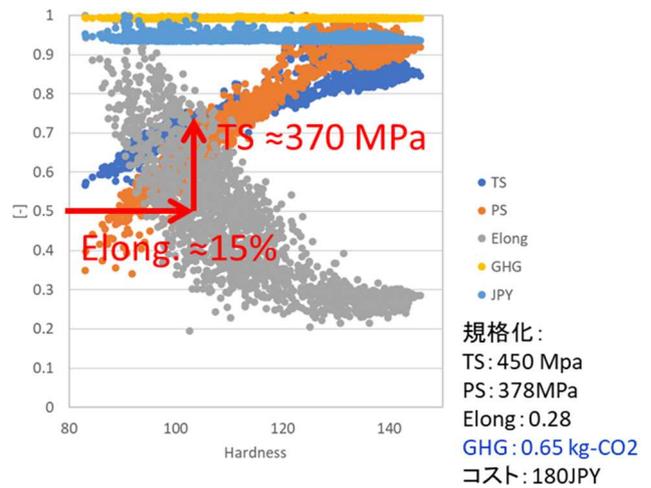


図 4.4.45. AI 解析結果

将来需要推計については、日本の経済統計等と AI 解析を用いて、日本における 2050 年までの自動車需要の推計を行うとともに、アルミニウムに関する型番別のマテリアルフロー解析を行い、型番別に用途と使用量の関係性を明らかにした (図 4.4.46)。今後は、両成果を元に、将来の自動車需要を前提に、将来の日本における再生アルミニウム材の需要と、アルミ廃材の供給量について推計を行う予定である。また、得られた将来の再生アルミニウム材の需要と、LCA 評価による再生アルミニウム材 1kg あたりの環境負荷より、将来の日本における再生アルミニウム材の普及に伴う環境負荷削減効果を推計する予定である。

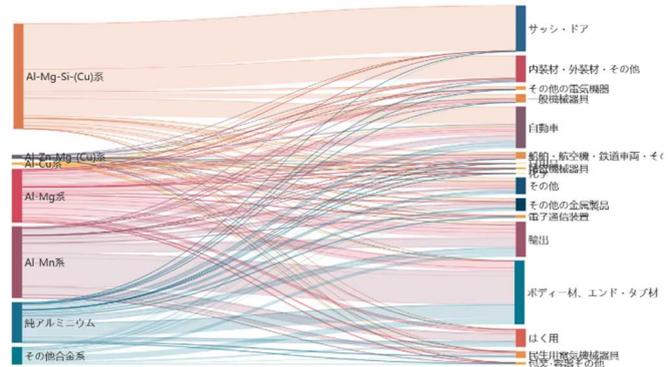
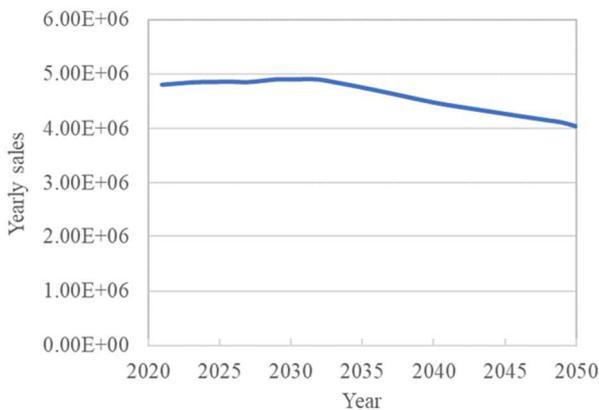


図 4.4.46 将来需要推計 (マクロ)

最後に、将来需要推計について、よりミクロな解析を行うことを目的に、空間情報解析と SNS 情報解析を用いた需要推計手法の開発を行っている (図 4.4.47)。空間情報解析により、日本における様々な空間情報と AI 解析を組合せ、アルミニウムの需要とアルミ廃材の供給について、地理的な解析を行うことが可能である。現在、神戸地区を事例として、将来の住宅の解体に伴うアルミ廃材の供給量について地理的な解析を行い、手法の開発を行っている (図 4.4.47 左)。また、SNS 情報解析により、アルミニウム使用製品のブランドレベルまでの需要の解析を行うことが可能である。現在、POS データによる日本全国の缶ビールの需要データと Twitter 社のデータベースによる缶ビールに関するツイート情報の整備を行うとともに、SNS 情報の解析手法の検討を行い、今後実際の事例に基づいた SNS 情報解析を行うための研究基盤を整備している (図 4.4.47 右)。今後は、空間情報解析について、より広い範囲

への手法の適用を目指すとともに、SNS 情報解析については、実際に缶ビールに関する需要推計を行い、推計精度の検証を行う予定である。

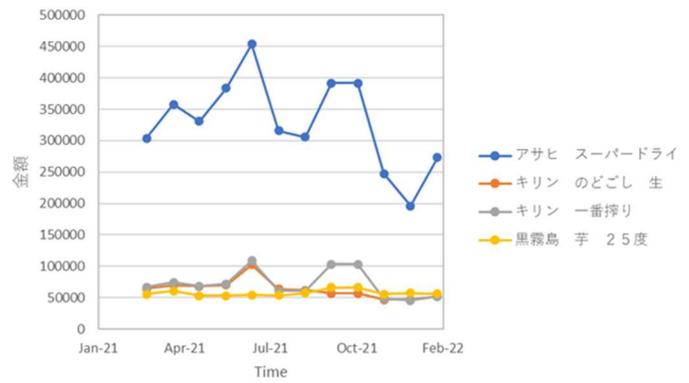
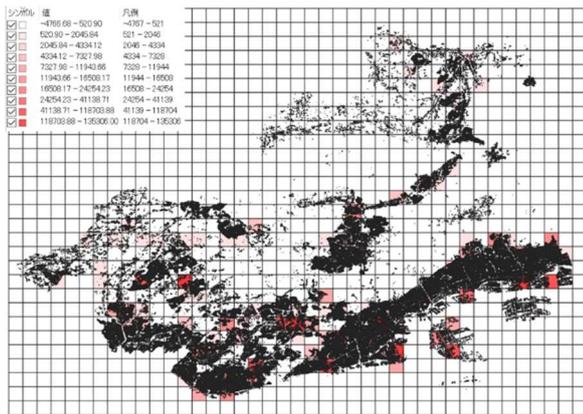


図 4.4.47 需要推計 (マイクロ)

## 研究開発成果の詳細 ②-5 運営・規格化（一般社団法人日本アルミニウム協会）

一般社団法人日本アルミニウム協会（以下アルミ協会と記す）は、本事業では運営および規格化を担当しており、現時点では運営に重点を置いた活動をしている。参加機関数が 23 機関と多く、工程も上流の選別・製錬から素材加工・製品への加工に至る一貫した工程によって形成されている。そのため、各研究課題間の連携が全体の進捗に影響を与える恐れがあった。第 2 年度からは第 1 年目以上に課題間の連携を強化するため、新たに「研究開発実務者会議」を開催し、研究分野の前後の進捗も共有しつつ、直接求められる要求品質を聞くことで、互いが実用品質を意識した活動ができています。これは、従来のサプライヤーとユーザーの関係から一步踏み込んだものとなっている。表 4.4.18 に現在実施している事業者主体で開催している会議を示す。

表 4.4.18 事業者主体の進捗共有を図る会議一覧

会議名	主要出席者	目的	頻度
研究開発推進委員会	外部有識者、UACJ他、NEDO、オブザーバー	事業の進捗等を外部有識者と共有し、アドバイス、意見を得る。オブザーバーの意見を収集しニーズ把握に繋げる。	3回/年程度
研究開発実務者会議	UACJ他	一気通貫の事業運営を円滑に図るため、各研究課題の進捗、供試材への要求を直接聞き、連携強化に繋げる。	4回/年程度
知財運営委員会	UACJ他	特許出願、研究発表、論文投稿等の研究成果の情報公開前に関係事業者間で討議し円滑な事業運営を図る。	6回/年程度
テーマ①-1 不純物元素除去進捗会議	UACJ他	溶解炉、電磁攪拌装置など設備に関する設計案作成、各担当の進捗状況確認	5回/年程度
テーマ②-1 縦型高速ダブル ロール鋳造機設計/進捗会議	UACJ他	縦型高速ダブルロール鋳造機に関する設備詳細設計案作成 各担当の進捗状況確認、詳細実験計画立案	12回/年程度
テーマ②-2 加工熱処理 進捗会議	UACJ他	各担当の進捗状況確認、詳細実験計画立案	6回/年程度
テーマ②-3 成形シミュレーション 進捗会議	UACJ他	各担当の進捗状況確認、詳細実験計画立案	3回/年程度

運営においては、参加機関間で知財合意書を締結し、開発項目に関する出願・論文投稿・研究発表・講演・展示等が発生した場合には、速やかに、申請書を発行の上、当該の研究開発項目に係る各機関に対して書面で連絡し、異議の有無を確認している。表 4.4.19 にその申請の実績を示す。プロジェクト開始から 2 年ということもあり、出願数は 2 件であり、何れも公開前の状態である。2023 年度については、研究が進んでいる研究開発項目について、研究発表・講演の依頼が多く見込まれる。

表 4.4.19 知財に係る申請書の件数

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	計
特許出願（うち外国出願）	0	2	0	－	－	2
論文	0	2	3	－	－	5
研究発表・講演	1	9	5	－	－	15
受賞実績	0	0	0	－	－	0
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	－	－	1
展示会への出展	0	1	0	－	－	1

（注意：2023 年 5 月 23 日現在。2023 年度は第一四半期に計画中のものを一部計画含む）

一方、規格化については、ラボ試作から小ロット試作へとステップアップする中で、実績を積みながら特性評価を重ねることが必要である。十分なデータとユーザーでの評価を得た時点で、特許出願等の権利確保し、本プロジェクトで開発したリサイクル由来の合金の標準化を進める。まずは合金番号を固定化するために、国際合金登録からスタートすることになる。その後の ISO 化、JIS 化においては、使用実績が問われる場合が多いため、開発合金を普及させる必要がある。新合金の用途としては、自動車材以外の鉄道、航空機等の輸送用機器材、建材、缶材等の包装材など多くの成形用材料および構造用材料への普及を進める。図 4.4.48 に標準化のスケジュールを示す。

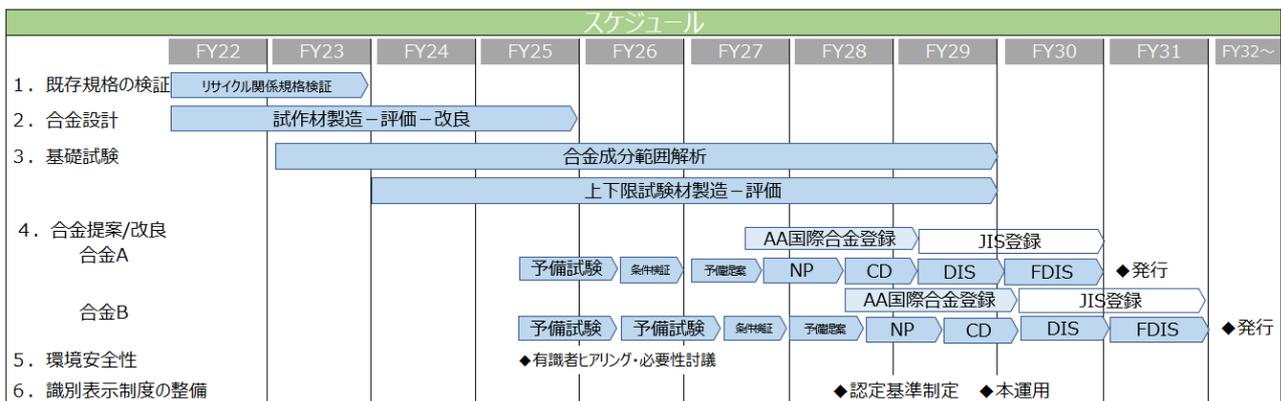


図 4.4.48 国際標準化までのタイムスケジュール

## 「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」基本計画

環境部

## 1. 事業の目的・目標・内容

## (1) 事業の目的

## ①政策的な重要性

近年、人口増加とそれに伴う資源・エネルギー需要の拡大、廃棄物量の増加、温暖化をはじめとする環境問題の深刻化が予測され、あらゆる経済活動において“循環経済(Circular Economy:CE)”への転換が求められている。アルミニウムは、資源循環向上の取組が特に期待される素材であり、輸送機器の軽量化等、CO<sub>2</sub> 排出量削減を目的とする用途において需要の大きな伸びが予測されているが、電解製錬により新地金を製造するため、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量原単位が 11.1 kg-CO<sub>2</sub>eq/kg と大きいという課題がある。一方、再生地金は、再生のためのエネルギー消費が小さく、その排出原単位が新地金の 1/20 以下と少ないことから、SDGs、CSR、ERG 投資などの影響により需要が増大しつつある低環境負荷のアルミニウム素材として活用が期待されている。ただし、アルミニウムスクラップのリサイクル過程で混入する不純物により、再生地金は一部の用途に使用が限定される状況にある。従って、低環境負荷型の再生地金の使用用途を拡大するための高度なリサイクル技術の開発は、アルミニウム素材を利用する国内製造企業における製品の環境性能向上を可能とし、資源制約の克服や地球環境問題の解決に貢献すると同時に、わが国企業の競争力向上につながる。

なお、アルミニウムのバリューチェーンには、リサイクル産業、合金メーカー、圧延メーカー、自動車メーカー等のユーザー企業と、多くの業界が関わっており、単一の企業・業界での研究開発は限界がある。バリューチェーンの一体的な取り組みが必要であるため、国が橋渡し役として各ステークホルダー間を繋ぐ必要がある。さらに、市場形成の不確実性が高い分野であることから、国の主導の下、循環システムの構築の方向性を示す必要がある。

## ②我が国の状況

第四次循環社会形成推進基本計画(2018年6月)において、アルミニウム等ベースメタルのリサイクルを一層促進するため、高度選別設備の開発・導入を支援するとともに、二次原料利用拡大に資する基準等の検討を行うこととしている。また、革新的環境イノベーション戦略(2020年1月)において、金属等の資源循環がCO<sub>2</sub>削減に寄与する重要技術として挙げられている。さらに、資源循環環境経済ビジョン2020(2020年5月)において、アルミニウム等ベースメタルについて、今後の需給見通しや再生材の利用可能性についての評価・分析の重要性について言及している。

日本におけるアルミニウム需要量に対する再生地金の割合は、世界平均を上回るものの、再生地金は混在する不純物のため、今後、需要が増加するとみられる展伸材に求められる高い材料性能が得られず、 casting material へカスケード利用される状況にある。現在は、アルミニウムス

クラップ発生量と鋳造材の需要が釣り合っているものの、今後、鋳造材の需要はスクラップの発生量を下回ると予想され、需給バランスが崩れることが懸念されている。そのため、アルミニウムスクラップを高性能な展伸材に再生可能な技術開発が望まれている。

### ③世界の取組状況

欧州アルミニウム協会が提唱した Circular Aluminium Action Plan では、30年以内に、アルミニウムの需要の50%について、使用後のアルミニウムスクラップを原料として供給することで、CO<sub>2</sub>排出削減にも貢献するとしており、今後、LCAの観点でアルミニウム再生材利用の技術開発が活発化する状況である。具体的な研究として、クローズドループの構築により、アルミニウム資源の一部を閉じた系の中で循環利用することに主眼を置いたものがある。

### ④本事業のねらい

本事業は、アルミニウム素材の高度資源循環を実現するため、溶解工程高度化による不純物元素軽減技術、鋳造・加工・成形技術高度化による微量不純物無害化技術などを組み合わせることにより、アルミニウムスクラップから高性能な再生展伸材を開発する。

## (2) 事業の目標

### ①アウトプット目標(最終目標、中間目標)

本事業の目標を以下の通り設定する。

中間目標(2023年度):

アルミニウム素材の高度資源循環システムの構築に目途をつける。具体的には、アルミニウムスクラップからアルミニウム展伸材へのリサイクルに向けて、以下の研究開発項目に掲げる技術開発を組み合わせ、以下を達成する。

#### ・研究開発項目①不純物元素低減技術の開発

Si:5%以上を含むアルミニウムスクラップからSi:3%以下の再生アルミニウムを70%以上回収可能とする技術を開発する。

#### ・研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

Si:3%を含む再生材を使用したAl-Mg-Si系(6000系)合金で、以下の特性を有する材料を得るための技術を開発する。

従来の新地金ベースAl-Mg-Si系(6000系)成形用板材と引張強度同等で、伸び0.8倍

従来の新地金ベース6000系構造用材料と伸び同等で、引張強度1.2倍

最終目標(2025 年度):

アルミニウム素材の高度資源循環システムの構築に資する基盤技術を確立する。具体的には、アルミニウムスクラップからアルミニウム展伸材へのリサイクルに向けて、以下の研究開発項目に掲げる技術開発を組み合わせ、以下を達成する。

・研究開発項目①不純物元素低減技術の開発

Si:7%以上を含むアルミスクラップから Si:3%以下の再生アルミニウムを 70%以上回収可能とする技術を開発する。

・研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

Si: 3%を含む再生材を使用した Al-Mg-Si 系(6000 系)合金で、以下の特性を有する材料を得るための技術を開発する。

従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系(6000 系)成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.9 倍

従来の新地金ベース 6000 系構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.5 倍

②アウトカム目標

2040 年度までにアルミニウム圧延業界を中心に再生展伸材の製造技術を確立し、普及率 30%に当たる再生展伸材生産量 130 万トン/年、CO<sub>2</sub>削減量 968 万t/年を達成する。さらに、2050 年度までに中長期アウトカム再生展伸材生産量 257 万トン/年、CO<sub>2</sub>削減量 1,914 万 t/年を達成する。これにより、アルミニウム素材の高度資源循環システムの社会実装へと展開する。その結果として、国内企業における製品の環境性能向上による国際競争力強化、及び幅広い産業における温室効果ガス排出量削減を実現する。

③アウトカム目標達成に向けての取組

設定したアウトカム指標(2040 年度に再生展伸材生産量:130 万トン/年、普及率 30%)の達成に向け、研究開発項目間で連携を図りながら、本事業での基盤技術確立を推進する。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目に掲げる技術開発を実施する。

本事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」の開発が必要となるが、実現には企業の積極的な関与が欠かせないことから、助成事業として実施する(NEDO負担率: 1/2 助成)。

研究開発項目①不純物元素低減技術の開発

溶解アルミニウムが凝固する際、純度の高い固体が先に現れる現象を利用して不純

物元素を低減する技術を開発する。電磁攪拌や機械振動を用いた非接触攪拌技術を使うことにより、純度の高いアルミニウムの回収効率の向上を図る。

#### 研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

微量不純物存在下の材料特性を向上(高延性化、高強度化)させるため、微量不純物の無害化を可能とする鋳造圧延技術や加工熱処理技術の開発を行う。

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 事業の実施体制

プロジェクトマネージャー(以下「PM」という。)(候補)にNEDO環境部今西大介を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

NEDOは公募により研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等(以下「団体」という。)のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

#### ① 研究開発の進捗把握・管理

PMは、プロジェクトリーダーや研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を必要に応じて組織し、技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

#### ② 技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、必要に応じて本プロジェクトにおいて委託事業として実施する。

### (3) その他

本プロジェクトは非連続ナショナルプロジェクトとして取扱う。

### 3. 研究開発の実施期間

2021 年度から 2025 年度までの5年間とする。

### 4. 事業の評価に関する事項

NEDOは技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価の時期は、中間評価を 2023 年度、事後評価を 2026 年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

### 5. その他重要事項

#### (1)「プロジェクト基本計画」の見直し

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

#### (2) 根拠法

本事業は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 3 号及び第 9 号に基づき実施する。

### 6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2021 年 2 月、制定。

(2) 2021 年 12 月、プロジェクトマネージャーの変更。

## (別紙 1) 研究開発計画

### 研究開発項目①不純物元素低減技術の開発

#### 1. 研究開発の必要性

アルミニウムスクラップは、混入する不純物のため展伸材に求められる高い材料性能が得られず、鑄造材へ再利用されることとなる。しかし、今後は鑄造材の需要はスクラップの発生量を下回ると予想され、需給バランスが崩れることが懸念されている。そのため、鑄造材を含むアルミニウムスクラップを高性能な展伸材に再生可能な技術開発が必要とされている。

#### 2. 具体的な研究内容

溶解アルミニウムが凝固する際、純度の高い固体が先に現れる現象を利用して不純物元素を低減する技術を開発する。電磁攪拌や機械振動を用いた非接触攪拌技術を使うことにより、純度の高いアルミニウムの回収効率の向上を図る。

#### 3. 達成目標

中間目標(2023 年度):

Si:5%以上を含むアルミスクラップから Si:3%以下の再生アルミニウムを 70%以上回収可能とする技術を開発する。

最終目標(2025 年度):

Si:7%以上を含むアルミスクラップから Si:3%以下の再生アルミニウムを 70%以上回収可能とする技術を開発する。

### 研究開発項目②微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

#### 1. 研究開発の必要性

研究開発項目①に述べた通り、鑄造材を含むアルミニウムスクラップを高性能な展伸材に再生可能な技術開発が必要とされており、研究開発項目①では、不純物元素の低減によって、純度の高いアルミニウムを得る技術開発を実施する。ただし、この手法のみで新地金と同等まで不純物を減らすのはコスト面から無理があると想定される。よって、不純物元素がある程度低減された再生アルミニウムから、展伸材への利用を可能とする技術開発が必要となる。

#### 2. 具体的な研究内容

微量不純物存在下の材料特性を向上(高延性化、高強度化)させるため、微量不純物の無害化を可能とする鑄造圧延技術や加工熱処理技術の開発を行う。

### 3. 達成目標

中間目標(2023 年度):

Si: 3%を含む再生材を使用した Al-Mg-Si 系(6000 系)合金で、以下の特性を有する材料を得るための技術を開発する。

従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系(6000 系)成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.8 倍を達成する。

従来の新地金ベース 6000 系構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.2 倍を達成する。

最終目標(2025 年度):

Si: 3%を含む再生材を使用した Al-Mg-Si 系(6000 系)合金で、以下の特性を有する材料を得るための技術を開発する。

従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系(6000 系)成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.9 倍を達成する。

従来の新地金ベース 6000 系構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.5 倍を達成する。

(別紙2) 研究開発スケジュール

	R03 2021	R04 2022	R05 2023	R06 2024	R07 2025	R08 2026
①不純物元素 低減技術の 開発						
②微量不純物を 無害化する 高度加工技術等 の開発						
評価時期			中間 評価			事後 評価

## 資源循環（プラスチック、アルミニウム） 分野の技術戦略策定に向けて

2019年11月

<b>1</b> 章	資源循環分野の概要	2
1-1	資源循環に関する世界の動き	2
1-2	資源循環のCO <sub>2</sub> 排出削減への寄与	3
1-3	国内外のリサイクルメジャー	5
<b>2</b> 章	プラスチックリサイクル	6
2-1	市場規模・予測	6
2-2	国内における現状	7
2-3	国内外の政策動向	8
2-4	特許・論文の動向	11
2-5	標準化の動向	13
2-6	技術体系と課題	13
<b>3</b> 章	アルミニウムリサイクル	15
3-1	市場規模・予測	15
3-2	国内における現状	16
3-3	国内外の政策動向	17
3-4	特許・論文の動向	20
3-5	標準化の動向	21
3-6	技術体系と課題	22
<b>4</b> 章	おわりに	23

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

## 1章 資源循環分野の概要

### 1-1 資源循環に関する世界の動き

2015年9月の国連サミットでは2016年から2030年までの国際目標としてSDGs (Sustainable Development Goals) が採択された。これに基づき、各国はSDGsに向けた取組の具体化や支える政策の立案が求められている。

なかでも、資源効率性の向上を目指す資源循環は、図1に示すように、温暖化対策や海洋プラスチック問題など、地球規模の様々な課題解決につながることに加え、産業を支えるサプライチェーンに変化をもたらす重要な概念となっている。

特に、循環経済 (CE: Circular Economy) や資源効率 (RE: Resource Efficiency) 等の概念をビジョンとして掲げる欧州が、国際的な議論を先導しており、欧州委員会 (EC: European Commission) が戦略方針を示し、各国の具体的な政策につなげている。

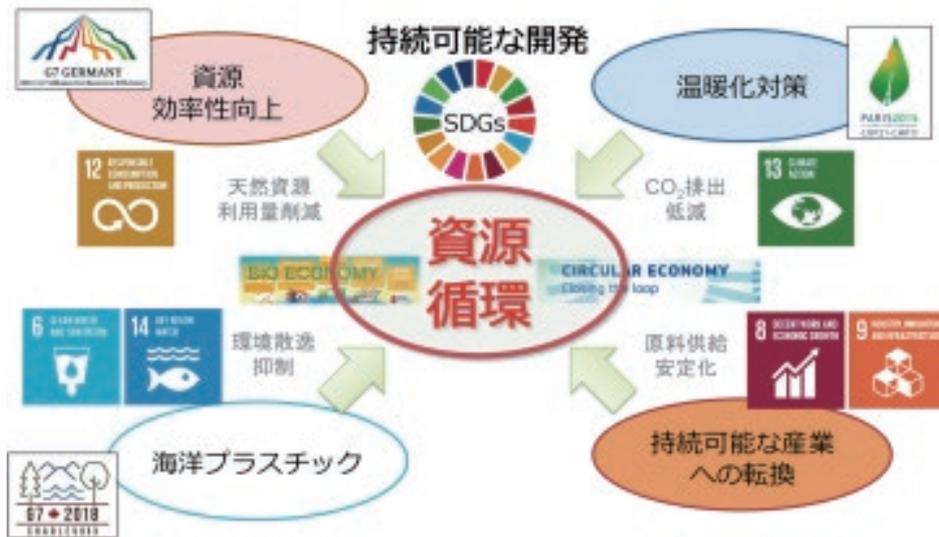


図1 SDGsに関連するグローバル課題に対する資源循環分野の位置付け  
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

## 1-2 資源循環のCO<sub>2</sub>排出削減への寄与

再生可能エネルギー導入など、エネルギー分野におけるCO<sub>2</sub>削減が急速に進む中、産業分野では、高コストなどの理由から、その進展は相対的に遅くなっている<sup>※1</sup>。省エネが進む先進国ほど産業分野のCO<sub>2</sub>削減には多くのコストがかかる傾向にある。このような中、資源循環は、CO<sub>2</sub>

排出削減への寄与も期待されている。図2は、EUではCEの推進にあたり、鉄、プラスチック、アルミニウム、セメントと、主要な素材ごとのCO<sub>2</sub>排出抑制のインパクトについて、スウェーデンのSITRAが分析した結果を示している。CEに関する対策で最もCO<sub>2</sub>排出抑制のインパクトが大きいのは素材のリサイクルであり、CO<sub>2</sub>総排出量の約3割が抑制できると報告している。

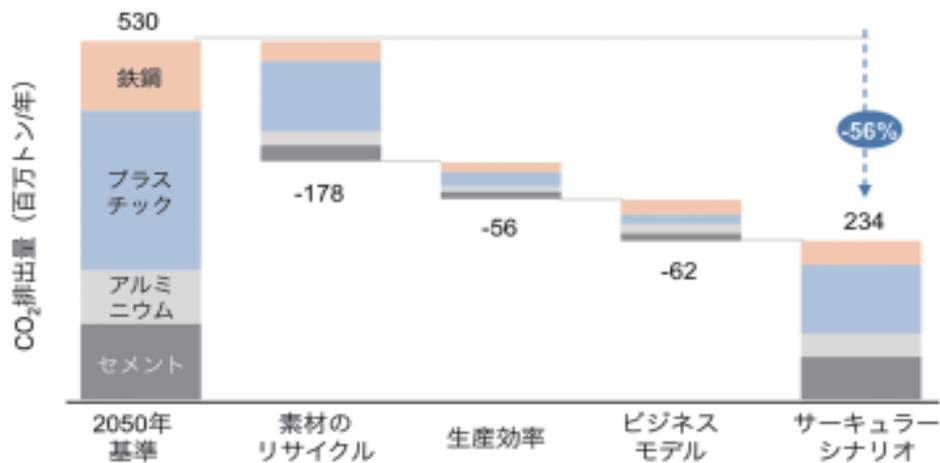


図2 CE進展による素材ごとのCO<sub>2</sub>排出削減効果

出所：MATERIAL ECONOMICS 2018, The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation (SITRA, 2018)<sup>※2</sup>を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2018)

※1 World Energy Outlook 2018 (IEA, 2018)  
Renewables 2018 (IEA, 2018)  
<https://www.iea.org/media/presentations/Renewables2018-Launch-Presentation.pdf>  
Energy Efficiency 2018 (IEA, 2018)  
<https://www.iea.org/efficiency2018/>

※2 MATERIAL ECONOMICS 2018, The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation (SITRA, 2018)  
<https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1>

## 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

日本における代表的な素材について俯瞰的な分析を行った結果を図3に示す<sup>※3</sup>。図の縦軸は素材生産に係るCO<sub>2</sub>排出量、横軸は資源調達リスク<sup>※4</sup>、円の大きさは素材産業の売上を示している。

希少金属、いわゆるレアメタル、レアアースは素材生産に係るCO<sub>2</sub>排出量は少ないが、調達リスクが大きく、国内産業への影響も大きいと、2017年度に技術戦略を策定し、NEDOは「高効率な資源循環システムを構築するためのリサイクル技術の研究開発事業」にて技術開発を実施している。

一方、CO<sub>2</sub>排出量が多く、調達リスクもある程度大きいものとして、プラスチック、アルミニウム、鉄鋼、銅等が挙げられる。これらは、図2にて示したSITRAの検討でも循環によるCO<sub>2</sub>排出抑制ポテンシャルが大きい素材として挙げられていたものである。また、売上高、CO<sub>2</sub>排出量が最

も多い素材が鉄鋼であるが、日本においては、既に電炉によるリサイクルの仕組みが出来上がっており、回収可能なほとんどの二次材が生産の中に組み込まれている<sup>※5,6</sup>。このような状況を踏まえて、本書ではアルミニウムとプラスチックを対象素材とした。

資源循環を進展させるためには、現行の3R (Reduce・Reuse・Recycle) に新たな価値を付加する技術やそれに合わせたシステム、制度設計などの取組が必要である。高度化された技術、システムや制度等の社会実装は、再生品が備えるCO<sub>2</sub>フットプリントや資源利用率などの環境価値の浸透も加わり、今後、循環産業の自立・成長を促し、経済成長と環境負荷低減を両立した、持続可能な社会の発展に貢献すると考えられる。なお、本書では、高度化された資源循環の取組を「3R+(プラス)」と名付けた。

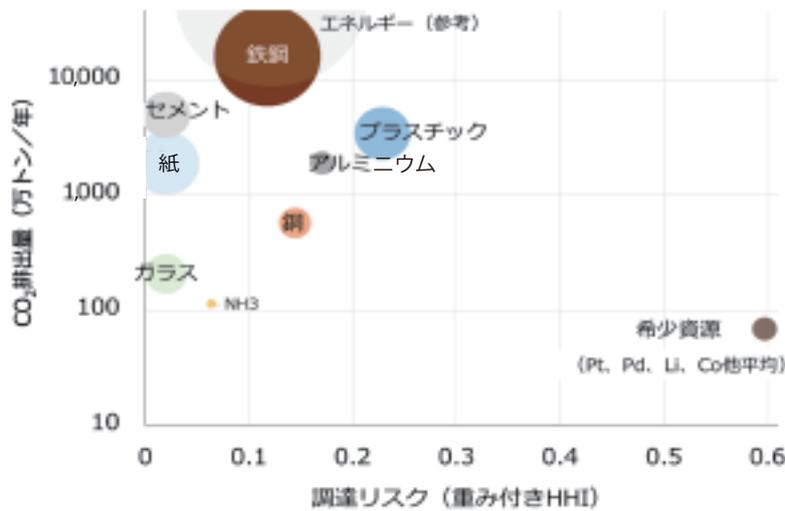


図3 日本における主要素材に関するCO<sub>2</sub>排出、調達リスク、経済規模  
出所：各種資料<sup>※4</sup>を基にNEDO技術戦略研究センター作成<sup>※5,6</sup>(2018)

※3 鉱物資源マテリアルフロー (JOGMEC, 2017)

CFPプログラム「CO<sub>2</sub>換算量共通原単位データベース」  
(産業環境管理協会, 2018-11-13参照)  
<https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/database2012-2.html>  
金属鉱物資源の安定供給に関する一考察 (JOGMEC, 2015)

鉱物資源をめぐる現状と課題 (経済産業省, 2014)

The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation  
Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry  
(SITRA, 2018)

※4 資源調達における調達安定性は「ハーフィンダール指数 (HHI)」という統計的な指標を活用することで評価でき、調達先の供給リスクを考慮した値を「重み付HHI」と呼ぶ。本評価では権益分、開発輸入、リサイクルを考慮している。

※5 CO<sub>2</sub>排出量は排出原単位×生産量を元にリサイクル率を考慮、プラスチックは焼却含む。市場規模は単価×生産量、HHI算出で権益分、開発輸入、リサイクルを考慮。バイオマス(林業)の売上、CO<sub>2</sub>排出量は産業連関表から抽出(2018年7月)。

※6 リサイクルデータブック (産業環境管理協会, 2018)

ゼロカーボン・スチールへの挑戦 (日本鉄鋼連盟, 2018)  
[http://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/zerocarbon\\_steel\\_honbun\\_JISF.pdf](http://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/zerocarbon_steel_honbun_JISF.pdf)

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## 1-3 国内外のリサイクルメジャー

欧米では民間企業による大規模、一括収集・自動選別により大規模なリサイクルが推進されており、フランスのVEOLIA や米国のWMなどは、リサイクルメジャーと呼ばれ、中国や東南アジアなどへ海外進出し、廃棄物処理を行っている。図4に欧米のリサイクルメジャーと日本の廃棄

物処理業の売上比較を示す。国内企業に比べて、欧米企業の売り上げは10倍以上になっている。国内では、旧態から地元企業志向が強く、全国的に地場企業による処理が行われてきており、数多くの中小企業、及び排出者の分別処理により質の高いリサイクルが推進されてきた。国ごとに異なるこのような環境は、リサイクルを推進する上で重要な視点となる。

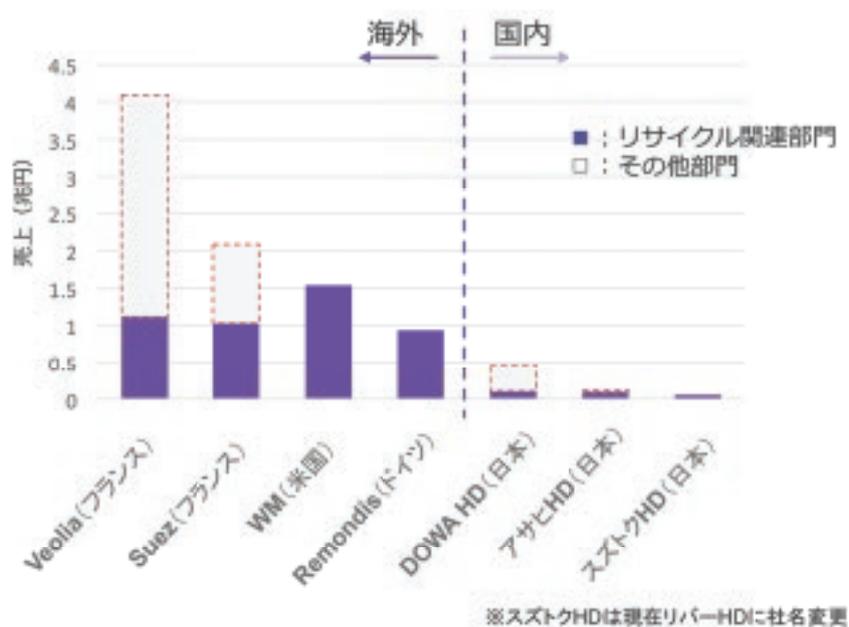


図4 日米欧における廃棄物処理業の売上比較 (2015年)

出所：各種資料<sup>\*7</sup>を基にNEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

\*7 SPEEDAを使った情報検索等

## 2章 プラスチックリサイクル

### 2-1 市場規模・予測

プラスチックは、生活用品、住宅、自動車等、さまざまな分野で利用され、今後、世界の生活水準が向上するとともに、世界のプラスチック需要の急拡大が予想される。IEA (International Energy Agency) によるプラスチッ

クの生産量予測によると、2017年の3億5,000万トン/年に対し、2050年には6億トン/年弱までの増加が予想されている<sup>※8</sup>。生活水準の向上によって、一人当たりで換算した生産量においても、2017年の47kg/人が2050年には60～75kg/人まで増加すると予測されている。

日本におけるプラスチックの生産実績の推移を表1に示す<sup>※9</sup>。2012年から微増傾向にあり、2017年の生産量は約1,100万トン/年と、世界全体の約3%を占める。一方、一人当たりの消費量は75kg/人と米国、西欧に次いで多い<sup>※10</sup>。

表1 日本のプラスチック生産実績(単位:千トン/年)

	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
熱可塑性樹脂	9,326	9,424	9,458	9,757	9,599	9,866
その他の樹脂	1,194	1,156	1,150	1,081	1,153	1,154
合計	10,520	10,579	10,608	10,838	10,753	11,020

出所：プラスチック工業連盟 Web サイトを基に技術戦略研究センター作成 (2018)

※8 The Future of Petrochemicals, Towards more sustainable plastics and fertilisers (IEA, 2018)

※9 プラスチックリサイクルの基礎知識(プラスチック循環利用協会, 2019)  
<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf>

※10 プラスチック原材料生産実績(確定値)(プラスチック工業連盟, 2012年～2017年)  
[http://www.jpif.gr.jp/3toukei/conts/nenji/y\\_genryou\\_c\\_2.htm](http://www.jpif.gr.jp/3toukei/conts/nenji/y_genryou_c_2.htm)

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## 2-2 国内における現状

2017年の日本におけるプラスチックリサイクルの状況を図5に示す。輸入品を除く国内のプラスチック供給量は、1,128万トン/年で、このうち廃プラスチックの再生品への利用は53万トン/年で約5%を占める。輸出分を除き国内で消費される正味の需要は980万トン/年で、約4割を容器・包装用途が占める。一般廃棄物として407万トン/年、産業廃棄物として492万トン/年、合計899万トン/年のプラスチックが廃棄されている。消費に対するプラスチック回収の割合は92%と高く、この高い回収率は世界の動向

と比較して、高い消費者意識、回収システム等が日本の特長となっている<sup>※11</sup>。

マテリアルリサイクルとして再利用されている廃プラスチックの量は、輸出も含めると、206万トン/年であるが、昨今の中国の輸入禁止措置などにより、輸出分153万トン/年の処理が課題となっている。コークス炉やガス化の原料(ケミカルリサイクル)として36万トン/年、固形燃料、発電、熱利用の熱エネルギー回収(サーマルリサイクル)に516万トン/年が利用されている。廃プラスチックの84%が何らかの形で処理されているが、一方で、輸出分を除くマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルの割合は極めて低いといえる。

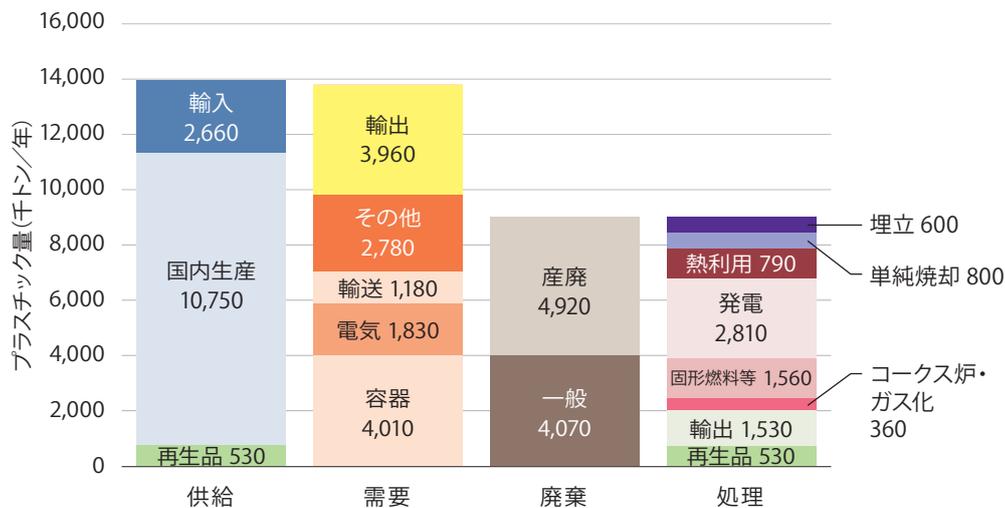


図5 日本におけるプラスチックリサイクルの現状 (2017年)  
出所：各種資料<sup>※11</sup>を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2018)

※ 11 リサイクルデータブック (産業環境管理協会, 2018)

プラスチックリサイクルの基礎知識 (プラスチック循環利用協会, 2019)  
<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf> (2018-11-06参照)

## 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## 2-3 国内外の政策動向

## (1) EU

EUが2018年に発表した「欧州プラスチック戦略」では、バリューチェーン全体でプラスチックがもたらす課題に対処する戦略を提案した。このなかで、2030年までに、1) 全てのプラスチック包装をリユース又はリサイクル可能にすること、2) 欧州で発生するプラスチック廃棄物の半分以上をリサイクルすること、3) 欧州のリサイクル能力を2015年比で4倍にする、というビジョンを掲げており、リサイクルを促進するため、以下の取組を進めるとしている。

- リサイクル性を高めるための製品設計の改善
- リサイクルされたプラスチックの需要促進
- より優れ、かつ調和した分別収集と選別

EUではCEに関するビジョンや欧州プラスチック戦略に基づき、2014年から2020年までの7か年計画である科学技術計画(Horizon2020)の中で研究開発プロジェクトが進行中である。CEはHorizon2020の横断的活動の中の重点領域に設定されており、各産業分野(建設、自動車、家電、住宅、太陽光発電、紙・パルプ産業等)から廃棄される製品中の鋼材、銅、アルミニウム、チタン、プラスチック、ガラス、複合材料など、経済的に回収するための技術開発・システム開発・制度設計を2013年から2019年にかけて総額120億円程度を支援している。

その中で、プラスチックの循環に関連する主要なプロジェクトについて表2にまとめた。EUでは、ケミカルリサイクルやマテリアルリサイクルに関する萌芽期の研究開発プロジェクトから、バリューチェーンを網羅したプラットフォームを構築するための実証プロジェクトまで、幅広く進められており、併せてシステム分析やデータベース構築を進めるこ

表2 EUにおける主要なプラスチック循環の研究開発プロジェクト

名称	コーディネーター	概要	期間EU予算(PJ予算)
cPET	GR3N SAGL (スイス)	着色された容器、トレイ、繊維製品等を経済的にケミカルリサイクルするためのマイクロ波利用解重合技術を開発した。	2018/9~2019/2 0.07億円(0.09億円)
CRNPE	RECYCLING TECHNOLOGIES LTD. (イギリス)	難リサイクルの廃プラスチックを低硫黄燃料油へリサイクルするため、染料等の添加剤由来の汚染物質を除去するガスろ過システムを開発した。	2017/9~2018/8 0.1億円(0.1億円)
POLYMARK	PETCORE EUROPE AISBL (ベルギー)	食品接触承認プラスチックと非承認プラスチックの分離を可能とするプラスチック自体をコード化したマーキングおよび識別システムを開発した。	2014/1~2017/3 1.9億円(3.0億円)
RUBSEE	SADAKO TECHNOLOGIES SL (スペイン)	廃棄物処理施設における高付加価値物選別の高度化のための、コンピュータビジョンと人工知能を使用したリアルタイム監視システムを開発した。	2017/2~2019/1 1.7億円(2.4億円)
HR-Recycler	Ethniko Kentro Erevnas Kai Technologikis Anaptyxis (ギリシャ)	WEEE(Waste Electrical and Electronic Equipment)をリサイクルするための前処理における人間とロボットの協働によるソーティングプラントシステムを開発する。	2018/12~2022/5 8.8億円(8.8億円)
PlastiCircle	INSTITUTO TECNOLOGICO DEL EMBALAJE (スペイン)	ヨーロッパにおけるプラスチック廃棄物のリサイクル率を高めるための総合的なプロセスを開発し実行する。自動車部品、家具、ごみ袋等の回収、輸送、選別の高度化を行う。	2017/6~2021/5 10.3億円(11.4億円)
ECOBULK	EXERGY LTD (イギリス)	自動車、家具、建築分野の複合プラスチック製品の再利用、アップグレード、修理、リサイクルを促進するため、プロセス、技術、ビジネスモデルを開発し、プラットフォーム化する。	2017/6~2021/5 12.8億円(16.0億円)

出所：CORDIS<sup>※12</sup>、InnovateUKを基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

※12 European Commission. "Project information - CORDIS"  
https://cordis.europa.eu/projects/en

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

とで、社会への実装を促進している。

## (2) 米国

DOE (アメリカ合衆国エネルギー省) のエネルギー効率・再生可能エネルギー局 (EERE: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy) が2017年5月にREMADE (Reducing Embodied-energy And Decreasing Emissions) として、リサイクルやリユース全般に関する総額75億円、5年間の資金提供プログラムを開始した。

REMADEでは、金属・ポリマー・繊維・E-waste (電気・電子機器廃棄物) を対象とし、1) 二次原料や再生材料利用における材料のトレーサビリティ確保、2) 廃棄物削減、予測を行うための情報収集、標準化、及び設計ツール、3) 廃棄物の迅速な採取・識別・ソーティング、4) 混合材料の分離、指定有害物質の除去、5) 強靱でコスト効率の

高い処理・処分法の5つを重点領域としている。

REMADEプログラムの技術的達成指標として、主に以下のような目標が掲げられている。REMADEプログラムの中で、プラスチックの循環に関する技術開発を表3に示す。

- 製造プロセスにおけるバージン材料投入量を30%削減
- 製造プロセスにおける二次材料投入量を30%増加
- エネルギー集約型材料のリサイクルを30%増加
- 二次材料のコストをバージン材料と同等程度にする

米国では、複雑なプラスチック含有廃棄物や多層フィルム等リサイクル困難なものに関する技術開発が進められており、EUと同様に、システム分析やデータベース構築を併せて行うことで、スムーズな社会実装を目指している。

表3 REMADEプログラムにおけるプラスチックリサイクル関連技術開発プロジェクト

名称	コーディネーター	概要
Platform Technology for Selective Recovery of Polymers and Residual Metals from Complex Polymeric Content Waste Streams, including e-Waste	Argonne National Lab.	電子廃棄物やその他の複雑なプラスチック含有廃棄物からABS(合成樹脂)、PS(ポリスチレン等)、PC(ポリカーボネート)、ABS/PCアロイを回収することができる選択的材料分離技術のプラットフォームを構築する。二次プラスチック材料供給を年間350万トン増加させることを目指す。
Reinforced Recycled Polymer Composites	Ohio State University	ボトル、カーペット等の廃PET(ポリエチレンテレフタレート)と他の材料を複合させ、新たな強化リサイクルプラスチックとすることで、高付加価値化を狙う。Niagara Bottling LLC, Shaw Industriesが参加。
Determining Material, Environmental and Economic Efficiency of Sorting and Recycling Mixed Flexible Packaging and Plastic Wrap	American Chemistry Council	包装やラップ等フレキシブルプラスチックの選別とリサイクル技術の開発とビジネスモデル検討、環境・コスト分析を行う。Resource Recycling Systems, Idaho National Laboratoryが参加。
Scalable High Shear Catalyzed Depolymerization of Multilayer Plastic Packaging	University of Massachusetts-Lowell	多層プラスチックフィルムを対象とした費用対効果の高いケミカルリサイクルに関する触媒重合手法を検討する。Michigan State, Unilever, ACC, National Renewable Energy Laboratoryが参加。
Systems Analysis for PET and Olefin Polymers in a Global Circular Economy	Michigan Technological University	ポリオレフィンとPETに関する回収とリサイクルを促進する技術等のシステム分析を可能にする枠組を開発する。American Chemistry Council, Idaho National Laboratoryが参加。

出所:REMADE Web サイト (REMADE Institute, 2019) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

## 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

### (3) 中国

プラスチックのリサイクルに関して、第13次5か年計画(工業绿色发展规划、2016～2020)の中で、プラスチックの国内循環量を2016年の1,878万トン/年から2020年までに2,300万トン/年へ増加させる目標を掲げている。その目標達成のために、主要な廃プラスチックの選別、再生、造粒に関する技術実証を行い、多様な品質の再生プラスチックの高付加価値化を支援し、大規模で高効率なりサイクルシステムの構築を推進している。研究開発の方針としては、廃プラスチックの自動識別選別技術の開発、紙、アルミニウム、鉄等とプラスチックの複合材料の分離技術、廃プラスチック改質などの高価値利用技術、廃プラスチックリサイクルの二次汚染防止技術、特殊機器の開発に注力する目標が掲げられている。

- 廃プラスチックの機械的選別技術
- 廃プラスチック活性化無機ファイバー改良、  
繊維増強改良、弾性体増韌改良、樹脂合金改良、  
分子鎖構造改良などの化学再生利用技術
- 廃ペットボトルを利用してポリエステルチップを生産する技術
- 廃プラスチック、廃木質材料を利用して  
ウッドプラスチック材料及び関連製品を生産する技術

### (4) 日本

2018年6月閣議決定の第四次循環型社会形成推進基本計画を踏まえ、資源・廃棄物制約、海洋プラスチックごみ問題等の幅広い課題に対応するための3RとRenewable(再生可能資源への代替)を基本原則とした「プラスチック資源循環戦略」(2019年5月)では、廃プラスチック有効利用率の低さ、海洋プラスチック等による環境汚染が世界的課題を解決するために、国内で適正処理・3Rを率先し、国際貢献も実施するとされている。一方、世界で2番目の1人当たりの容器包装廃棄量、アジア各国での輸入規制等の課題も併せて、解決するとしている。そのことにより、資源、環境問題を解決するばかりでなく、経済成長、雇用創出により、持続可能な発展を目指すことを目指している。また、世界的な協業により、必要な投資やイノベーション(技術、制度)の促進を図ろうとしている。

## 2-4 特許・論文の動向

### (1) 特許出願

プラスチックリサイクルに関する特許（実用新案を除く）を抽出し、分析を行った。5年毎の出願件数の推移（図6）では、総出願件数は2,200件程度と変化が小さいものの、

日本からの出願件数は減少傾向にあるのに対し、中国からの出願数は増加し続けている。

技術分類別（マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクル）の出願件数を比較すると（図7）、ケミカルリサイクルに関する特許出願が7割近くを占めており、研究開発が活発な技術領域である。

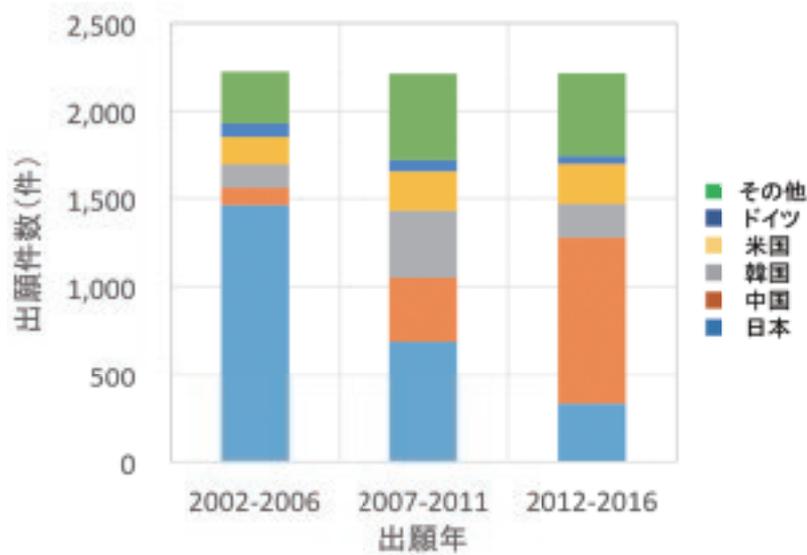


図6 プラスチックリサイクル技術に関する出願件数の推移 (5年毎)  
出所：Derwent World Patents Index™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2019)

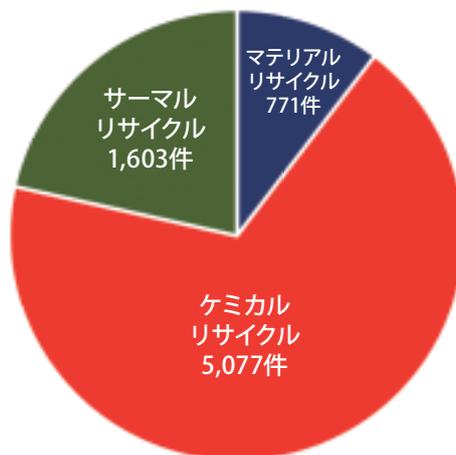


図7 プラスチックリサイクル技術別の出願件数 (2002年～2016年累積数)  
出所：Derwent World Patents Index™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2019)

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## (2) 論文発表

プラスチックリサイクルに関する技術論文(発行年:2002~2016年)を抽出し、分析を行った。国別の掲載件数について、5年毎の掲載件数の推移の分析(図8)からは、直近5年間ではおよそ3,000件に達しており、前期間(2007~2011年)に比べ1.4倍に増加していることが分かった。

特に、中国からは929件(期間:2012~2016年)に達し、前期間に比べ2.4倍となっていた。

技術分野別(マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクル)の件数を比較すると(図9)、特許出願動向と同様にケミカルリサイクルに関する件数が多く、全体の8割を超えており、学術研究も活発な技術領域である。

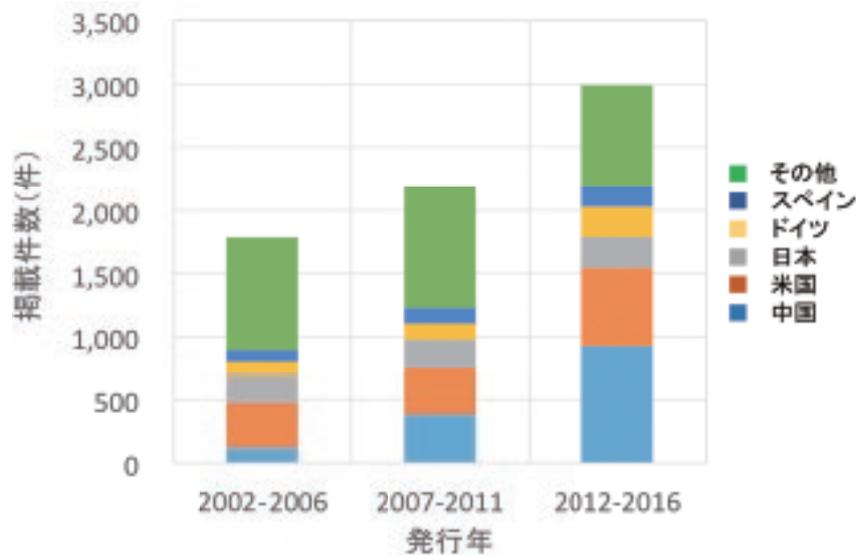


図8 プラスチックリサイクル技術に関する掲載件数の推移(5年毎)  
出所: Web of Science™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

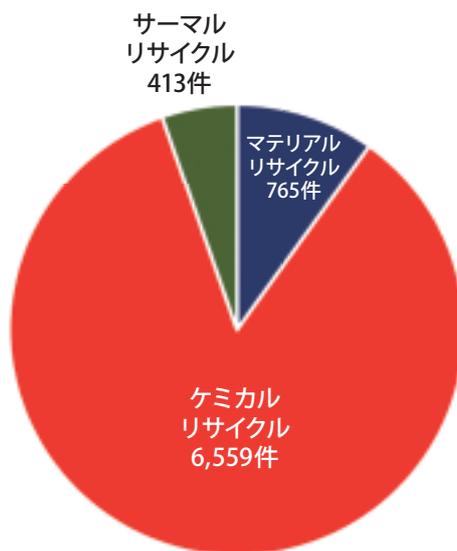


図9 プラスチックリサイクル技術別の掲載件数(2002年~2016年累積数)  
出所: Web of Science™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

## 2-5 標準化の動向

プラスチックリサイクルに関する標準化は、プラスチックの規格であるISO/TC61に包含されるように制定されてきた。リサイクル関連のISO 15270:2008(プラスチック・プラスチック廃棄物の回収及びリサイクルの指針)は、日本が提案し、2008年に制定されたものである。この規格に付随し、PET、ポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)の再生材の規格が制定されている。更に、マテリアルリサイクルによる再生材を用いた種々の製品規格(JIS)も併せて多数制定されてきた。これの規格群は、世界に先駆けて日本がリサイクルを推進してきたことを示している<sup>※13</sup>。

2013年になると、ISO 15270:2008を包含する新たなISO規格としてISO 18601:2013が制定された。本規格は全般規格として位置づけられ、環境配慮包装に関するものである。さらに、リユース(ISO 180603)とマテリアルリサイクル(ISO 18604)、エネルギー回収(ISO 18605)、及び生分解などの有機的リサイクル(ISO 18606)も併せて制定されている。特に、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルが促進された場合は、前述のISO 15270及びISO 18601規格への対応が必要になる<sup>※14</sup>。

## 2-6 技術体系と課題

プラスチックの製造、利用、リサイクルに係る工程と、本書で扱うプラスチックリサイクル技術を図10に、中間処理工程における要素技術とその内容について表4に示す。

容器包装や自動車、家電や、玩具、日用品等様々な製品に材料として利用されたプラスチックは、それぞれの廃棄処理ルートを経て収集され、静脈産業にてリサイクル処理が行われる。

最初に中間処理業にて再生処理に適した原料となるよう解体・破碎・選別等の前処理が行われ、次いでリサイクル処理としてマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクル処理が行われる。マテリアルリサイクルでは、不純物の除去や重合・解重合等が行われ、物性を向上させた再生樹脂として動脈産業に供給される。ケミカルリサイクルでは、熱や薬剤を用いて分解し、有用物の分離・精製が行われ、樹脂原料や化学原料として動脈産業に供給される。動脈産業では、コンパウンダーが製品加工等で求められる材料を新規樹脂や再生樹脂、添加剤等で成分調整し、製品加工業に供給する。製品加工業は、製品に求められる性能に応じた製品設計・成形加工を行い、市場に供給する。サーマルリサイクルでは、プラスチックはごみ発電施設等で燃焼・熱回収され、熱や電気等のエネルギーとして社会に供給される。

国内のプラスチックのリサイクルに関わる業者は、中小企業だけで約3万社程度と推定され、中間処理、再生処理、コンパウンドの工程を担っている。特に、主として廃棄物処理を実施している事業者は、処理コストの低減を優先して進展してきたため、最適な処理プロセスになっているとは言い難い。また、静脈産業間で情報連携が少ない、各市町村のごみ収集のルールが異なっている等の課題がある。そのため、今後の技術開発では、新たな制度設計や事業形態の高度化の検討が重要となっている。<sup>※15</sup>

※13 容器包装リサイクルワーキンググループの活動状況について  
(経済産業省 産業構造審議会 産業技術環境分科会, 2018)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/haikibutsu\\_recycle/pdf/032\\_03\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/pdf/032_03_01.pdf)

※14 3R連絡会、環境配慮包装に関する新規国際規格の開発・発行  
(ISO 18600シリーズ) (日本包装技術協会, 2014)  
<http://www.3r-suishinkyogikai.jp/data/event/H25R32.pdf>

※15 循環経済ビジョン研究会(第2回)、リサイクル事業者へのヒアリング調査結果  
(経済産業省, 2018)  
[http://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/junkai\\_keizai/pdf/002\\_06\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/junkai_keizai/pdf/002_06_00.pdf)

プラスチックを取り巻く国内外の状況 <第4回資料集> (環境省, 2018)

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

現在、廃製品としての回収率は98%以上として高いものの、国内の人件費が高いことや人手不足もあり、最近では、付加価値が高い廃製品までもが海外に流出しているケースも多い。その一方で、原料となる資源やプラスチック

原料を海外から輸入している状況である。国内の資源効率を向上させるには、処理コストを拡大させずに、廃プラスチックのリサイクルがより高効率に実現できる革新的な研究開発を行う必要がある。

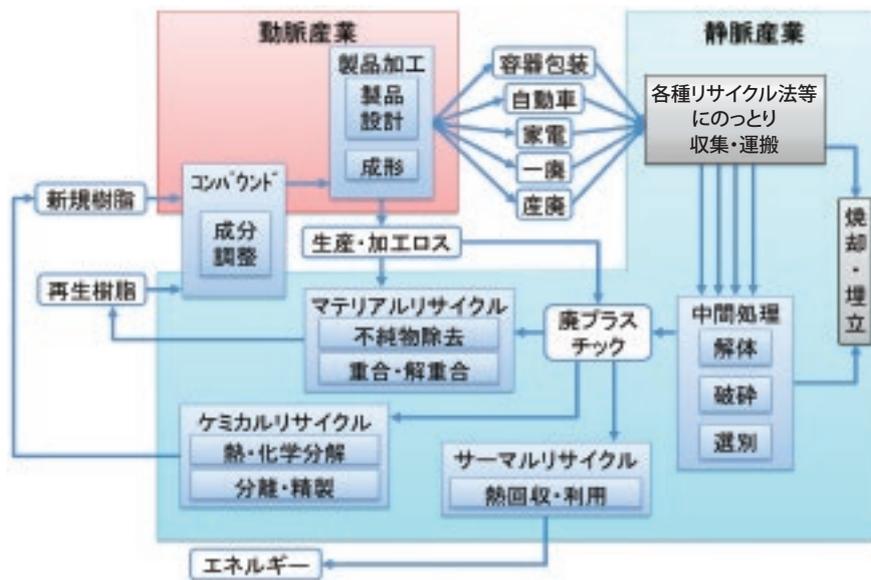


図10 プラスチックリサイクルシステムと要素技術  
出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2019）

表4 プラスチックリサイクル技術の体系

工程	要素技術	具体的な技術例
中間処理	解体	廃製品を部材に分離
	破碎	部材を素材単体に分離
	選別	素材ごとの分離・濃縮
マテリアルリサイクル	不純物除去	添加剤・染料など不純物の除去
	重合・解重合	プラスチックの重合度の制御
ケミカルリサイクル	熱・化学分解	熱・化学反応を用いた有用物への分解
	分離・精製	有用物の分離・精製
サーマルリサイクル	熱回収	熱交換器等による熱の回収、電気などへの変換
コンパウンド	成分調整	製品に求められる性能となるよう素材成分を調整
製品加工	成形加工	低物性材料の使いこなし、アップグレード
	製品設計	中間処理効率化のための商品形態・構造設計

出所：NEDO技術戦略研究センター作成（2019）

## 3章 アルミニウムリサイクル

### 3-1 市場規模・予測

軽量性、耐食性、熱・電気伝導性、加工性等、優れた性質を有するアルミニウムの需要は右肩上がりで増加している。図11に示すように、世界のアルミニウム需要は

2017年に9,000万トン/年を超え、中国を中心に2040年までに1億6,000万トン/年に増加すると予測されている。

また、用途別のアルミニウム中間製品需要量の予測を図12に示す。これまでのアルミニウム需要は建築・構造用途と自動車等運輸用途が牽引しており、将来的にも建築・構造及び運輸用途の需要の伸びは大きく、2040年ではそれぞれ約5,000万トン/年程度の需要へ成長すると予測されている。

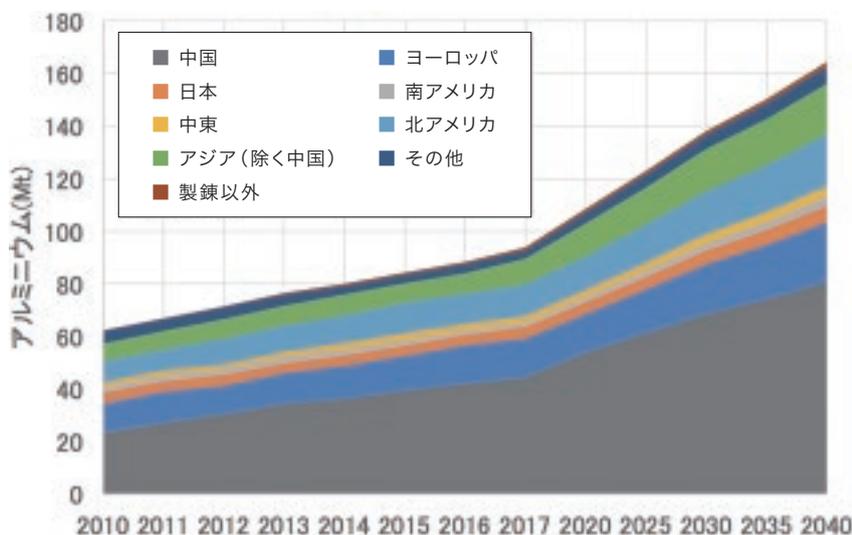


図11 世界におけるアルミニウム需要の推移と将来予測

出所：Regional Aluminium Flow Model 2017 (International Aluminium Institute, 2019) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

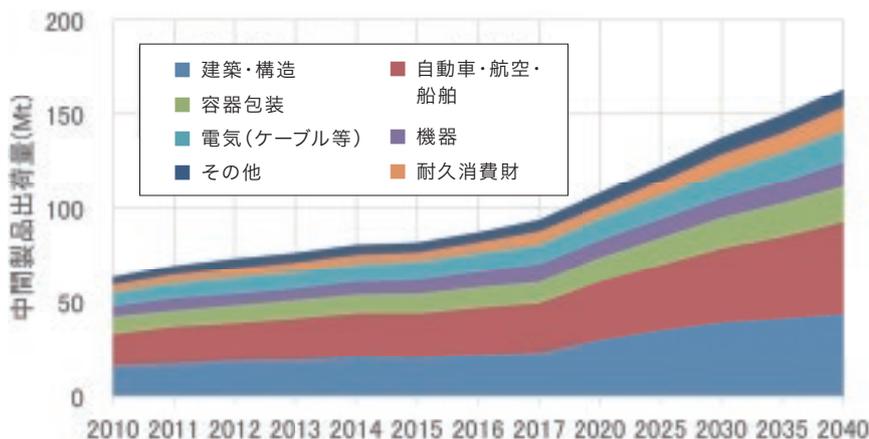


図12 世界におけるアルミニウム中間製品の出荷量の推移と将来予測

出所：Regional Aluminium Flow Model 2017 (International Aluminium Institute, 2019) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

## 3 -2 国内における現状

2016年の日本におけるアルミニウムリサイクルの状況を図13を示す。年間需要量は約400万トン/年である。材料として利用されるアルミニウムのうち、251万トン/年が新地金由来であり、主に高付加価値な展伸材向けに利用されている。

国内では新地金の製造は行われておらず、ほぼ全量を海外からの輸入に頼っている。残りの130万トンは二次地金(いわゆるリサイクル材料)である。そのほとんどは

鋳造材として用いられており、エンジンブロックが主な用途として挙げられる。また、130万トン/年が国内で回収されたスクラップとして回っており、アルミニウムのリサイクル率としては世界トップレベルであるといえる。

今後、自動車用エンジンの小型化、パワートレインの電化の進展により、国内における鋳造材需要の減少が見込まれる一方で、軽量化の要求から自動車向け展伸材需要の増加が想定されている。また、アルミニウムの需要量は増加しており、将来的に排出されるスクラップも増加することが予想されるため、需給バランスが将来的に崩れる可能性が高い。

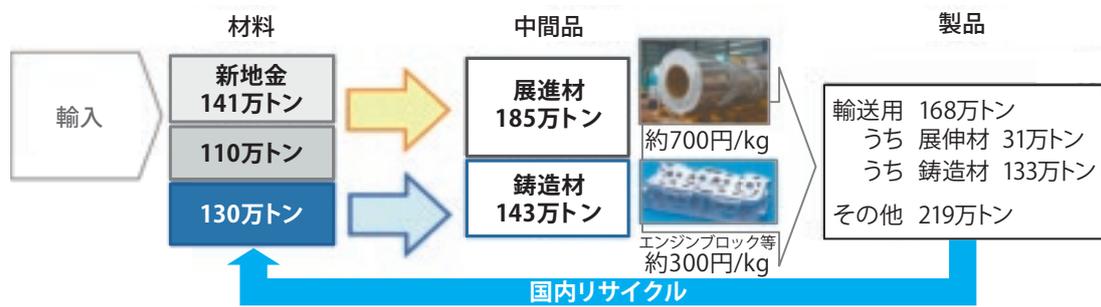


図13 日本におけるアルミニウムのマテリアルフロー (2016)

出所: 公開資料<sup>\*16</sup>を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

\*16 鋳物資源マテリアルフロー 2017 (JOGMEC, 2018)  
 輸入 110万トンは二次地金と二次合金地金を含む。これらのスクラップ使用率は不明。ストック品や中間製品の輸出のデータは含まれていない。

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## 3 -3 国内外の政策動向

### (1) EU

EUは従来の資源消費型の線形経済から、REを最大化する循環経済への転換を図り、2015年にCEパッケージをビジョンとして策定した。EUは「EU域外の資源産出国から供給される天然資源に依存しない、いわゆるEU域内で完結する循環資源利用の社会を目指し、再生品の品質が市場を決定する(リサイクル業者のための)市場を作りたい」と考えている。これは「バージン資源使用製品に対してリサイクル資源使用製品の競争力を強化する」ということを意味している。このCE(Circular Economy:循環経済)パッケージの中で、アルミニウム製容器包装について、2025年には50%、2030年には60%のリサイクルを目標と設定している。

また、先述したSITRAのレポートでは、アルミニウムの循環において重要なポイントを次のように挙げている。

- 製品設計の改善:分離・選別の複雑化の防止
- 材料の仕様:合金組成ベースから機能ベースの仕様へ

- 再使用:直接再使用の推奨
- 水平リサイクル:現状のカスケードリサイクルの防止
- 新たな製品解体プロセス:自動化、素材混合の防止
- 分離・選別の向上:安価なセンサー、自動化による低コスト化
- 洗練されたスクラップ市場:フローの把握
- 新たな製造プロセス:不純物除去・精製

EUではCEに関するビジョンや分析に基づき、Horizon2020の中で研究開発プロジェクトを進めている。CEはHorizon2020の中で横断的活動として焦点領域に設定されており、各産業分野(建設、自動車、家電、住宅、太陽光発電、紙・パルプ産業等)から廃棄される製品中の鋼材、銅、アルミニウム、チタン、プラスチック、ガラス、複合材料など、経済的に回収するための技術開発・システム開発・制度設計を2013年から2019年にかけて総額120億円程度支援している。

その中で、アルミニウムの循環に関連する主要なプロジェクトについて表5にまとめた。EUでは、製錬、地金製造、材料加工、スクラップ選別等、バリューチェーンを網羅するように研究開発プロジェクトが進められている。

表5 EUにおける主要なアルミニウム循環の研究開発プロジェクト

名称	コーディネーター	概要	期間EU予算(PJ予算)
ENSUREAL	SINTEF (ノルウェー)	改良Pedersen法を用いて低品質のボーキサイトからのアルミナ製錬を行うことで、EU領域内での持続可能なアルミニウムバリューチェーンを構築する。	2017/10~2021/9 9.0億円(11.2億円)
Aluminium ScrapDbase	BRUNEL UNIVERSITY LONDON (イギリス)	鉄不純物を含むアルミニウムスクラップ合金を使用して、高価値アルミニウム製品を製造することを可能にする方法を、固相挙動や結晶生成挙動を解析した。	2015/9~2017/8 0.6億円(0.6億円)
Recycal	LENZ INSTRUMENTS SL (スペイン)	アルミニウムスクラップを鍛造材に適用するため、高剪断加工(HSP)技術を用いた溶融調整プロセスにより、機械的特性を改善する微細構造を実現した。	2014/1~2016/12 3.0億円(4.0億円)
REALCAR2	Jaguar Land Rover Limited (イギリス)	使用済アルミニウムを使用して、低コストでエネルギー効率良く、5000番台のアルミニウムを使用して、軽量の車体構造を構築するための技術開発を行なった。	2013/2~2015/7 0.7億円(0.7億円)
REALITY	Jaguar Land Rover Limited (イギリス)	アルミニウム合金を分離し、その後展伸アルミニウム合金を合金種別毎にさらに分離するための、センサーベースのスクラップソーティング技術の開発および産業展開を目指してスケールアップを行なった。	2017/6~2020/3 2.0億円(3.0億円)
SHREDDERSORT	LENZ INSTRUMENTS SL, (スペイン)	自動車スクラップからの非鉄金属を選別し、二次アルミニウムの品質を向上させるため、LIBS(Laser Induced breakdown Spectroscopy)等のセンサーによる鑄造/展伸アルミニウム合金の選別技術を開発した。	2014/1~2016/12 4.2億円(5.6億円)
HR-Recycler	Ethniko Kentro Erevnas Kai Technologikis Anaptyxis (ギリシャ)	WEEEをリサイクルするための前処理における人間とロボットの協働によるソーティングプラントシステムを開発する。	2018/12~2022/5 8.8億円(8.8億円)

出所:CORDIS<sup>※12</sup>, InnovateUKを基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## (2) 米国

米国では、資源循環に関する取組は、製造業のエネルギー効率と経済性を向上させ、産業の競争力を強化する目的で行われている。DOEのEEREが2017年5月にREMADEとして、リサイクルやリユース全般に関する総額75億円、5年間の資金提供プログラムを開始した。REMADEプログラムの技術的達成指標として、主に以下のような目標が掲げられている。

- 製造プロセスにおけるバージン材料投入量を30%削減
- 製造プロセスにおける二次材料投入量を30%増加
- エネルギー集約型材料のリサイクルを30%増加
- 二次材料のコストをバージン材料と同等程度にする
- 5年以内に二次原料処理エネルギーを30%削減
- 10年以内に50%削減

REMADEプログラムの中で、アルミニウムの循環に関する技術の開発は、表6に示すような研究開発プロジェクトが実施されている。

また、ARPA-E (Advanced Research. Projects Agency-Energy : エネルギー高等研究計画局) ではエネルギー消費低減を目的に、次世代の自動車や構造材として需要が高まることが予想される軽金属 (Al, Mg, Ti) をターゲットに、省エネルギー・低コストなアルミニウム精錬技術と廃製品からのリサイクル技術を開発している。表7にARPA-Eの製品からの金属リサイクル関連プロジェクトを示す。特に、自動車スクラップからの軽金属合金の選別を目的としたソーティング技術の開発が行われており、REMADEプログラムに繋がっていると考えられる。

表6 REMADEプログラムにおけるアルミニウムリサイクル関連技術開発プロジェクト

名称	コーディネーター	概要
Rapid Sorting of Scrap Metals with Solid State Device	The University of Utah	非鉄金属スクラップからアルミニウムをEDX (electro-dynamic sorting) 技術により高選別効率・ハイスループットで選別する技術の開発。1t/hの処理速度、90%の回収率を目指す。
Increasing Melt Efficiency and Secondary Alloy Usage In Aluminum Die Casting	Ohio State University	アルミダイキャスト製造における、溶融プロセスの熱力学モデリングにより機構を解明し、高効率な溶融プロセスのための新たな添加剤、耐火材の開発や、より不純物許容度の高い二次アルミニウム合金の製造プロセスの設計を行う。North America Die Casting Association, Alcoaが参加。

出所: REMADE Web サイト (REMADE Institute, 2019) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

表7 ARPA-Eのアルミニウム精錬、リサイクル関連プロジェクト

名称	コーディネーター	概要	期間
ALUMINUM ELECTROLYTIC CELL WITH HEAT RECOVERY	Alcoa	アルミニウム精錬の効率向上、コスト低減を目的に、電解セルの高効率化と熱回収に関する技術を開発した。	2014~2018 4.52億円
ALUMINUM PRODUCTION USING ZIRCONIA SOLID ELECTROLYTE	INFINIUM	アルミニウム精錬の効率向上、CO <sub>2</sub> 排出抑制を目的に、電解精錬において従来の炭素電極からジルコニア電極へと転換するための技術を開発した。	2013~2016 4.21億円
ELECTROMAGNETIC LIGHT METAL SORTING	University of Utah	自動車からのアルミニウムスクラップを複数グレードに選別するため、可変電磁力による選別技術を開発した。	2014~2017 2.95億円
ELECTROCHEMICAL PROBE FOR RAPID SCRAP METAL SORTING	Palo Alto Research Center (PARC)	自動車からのアルミニウムスクラップを複数グレードに選別するため、イオン液体を用いた高速な電気化学分析による選別技術を開発した。	2013~2016 1.58億円
X-RAY DIAGNOSTICS FOR SCRAP METAL SORTING	UHV Technologies	自動車からのアルミニウムスクラップを複数グレードに選別するため、線形XRF (蛍光X線)を用いたソーターによる選別技術を開発した。	2014~2016 2.14億円

出所: ARPA-E Web サイトを基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2016)

## 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

### (3) 中国

中国は国家戦略として循環経済体制の構築を行っている。第13次5か年計画や中国製造2025の中で、製造業の強化方針の一つにグリーン製造の発展を挙げており、その主要目標として工業固形廃棄物の再利用率を2013年の63%から、2020年までに73%、2025年までに79%に引き上げようとしている。また、国家発展改革委員会は、「循環発展牽引行動」の中で資源循環産業市場は2020年に50兆円規模に拡大すると予測しており、それを実現させるため十大行動として、資源循環利用産業モデル地区の建設、鉱業資源総合利用産業蓄の建設、「インターネット+」資源循環の取組、再生製品普及の取組、技術革新の取組などを挙げている。

アルミニウムの循環に関しては、2011年から5年間、廃アルミ缶のリサイクル技術の開発プロジェクトが国家科学技術支援プログラムの支援の下、中国再生可能資源産業技術革新戦略同盟、北京科学技術大学、中北大学、及びZhaoqing Dazheng Aluminium Co., Ltd.が共同し、CAN to CANのグリーンリサイクル技術を開発し、社会実装している。

### (4) 日本

2018年7月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、鉱物資源の自給率の目標が示されている。2030年にベースメタル(銅・亜鉛)の自給率を80%以上、戦略レアメタル(レアアース・リチウム・タングステン等)については50%以上とすることを目指している。また、戦略レアメタルについては備蓄を着実に進め、供給途絶等の緊急時に需要家のニーズに応じて機動的に放出等できるよう備蓄体制の整備を進めていくとされている。さらに、日本再興戦略2016(2016年6月)では、「『都市鉱山』の利用を促進し、リサイクル業者や非鉄製錬業者等の成長を図るため、情報技術等を活用し、動静脈連携によりレアメタルなどの金属資源を効率的にリサイクルする革新技術・システムを開発する。」という方針が定められている。

政府方針に対応し、これまでに国内で行われてきたアルミニウムのリサイクルに関する技術開発プロジェクトを表8に整理した。

表8 日本における主なアルミニウムリサイクル関連技術開発プロジェクト

名称	参加企業	概要	期間PJ予算
非鉄金属系素材リサイクル促進技術研究開発(3Rプログラム)	JRCM、住友軽金属工業、神戸製鋼所、スカイアルミニウム、日軽金、古河電気工業、三菱アルミニウム、昭和電工	廃自動車、廃家電等からの非鉄スクラップからアルミニウム、銅、亜鉛等有用金属を回収するリサイクルプロセスの開発を目的とし、アルミニウムに関しては、内部ろ過フィルタによる非金属介在物除去や、真空蒸留法による亜鉛除去等の要素技術開発を行った。	1993~2002 56.9億円 (委託・助成) (全体)
アルミニウム系メゾスコピック組織制御材料創製技術(スーパーメタル)	JRCM、住友軽金属工業、神戸製鋼所、スカイアルミニウム、日軽金、古河電気工業、三菱アルミニウム	従来のアルミニウム材の1.5倍程度の材料性能(強度、耐食性、延性、加工性)向上を目的に、大型板材の金属結晶粒の極微細化(数 $\mu\text{m}$ )加工技術の開発を行った。	1997~2001 8.6億円 (委託)
アルミニウムの不純物無害化・マテリアルリサイクル技術開発(3Rプログラム)	JRCM、住友軽金属工業	廃自動車から回収されたアルミニウムの自動車への水平リサイクルを目的に、再生材中の除去困難な鉄を急冷凝固法により無害化する技術の開発を行った。	2002~2004 4.8億円 (委託)
「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業	ハリタ金属、日本アルミニウム協会、早稲田大学、AIST、中部大学	鉄道車両のアルミニウム材を水平リサイクルすることを目的に、LIBSソーティング技術によるアルミニウム合金選別システムの開発及び実証を行なう。	2016~2020 2.0億円 (2/3助成)

出所：各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

## 3-4 特許・論文の動向

### (1) 特許出願

アルミニウムリサイクルに関する特許(2002年～2016年)について、国別、及び5年間ごとに出願件数の推移の分析を行った。

国別の出願件数について、5年毎の出願件数の推移の分析(図14)より、中国では2007～2011年の出願数が1,300件であったが、直近5年間では4,800件以上と急増しており、当分野での研究開発が活発に行われている。一方、日本の出願件数は各期間でおおむね900件程度の出願となっており、研究開発は継続的に行われている。

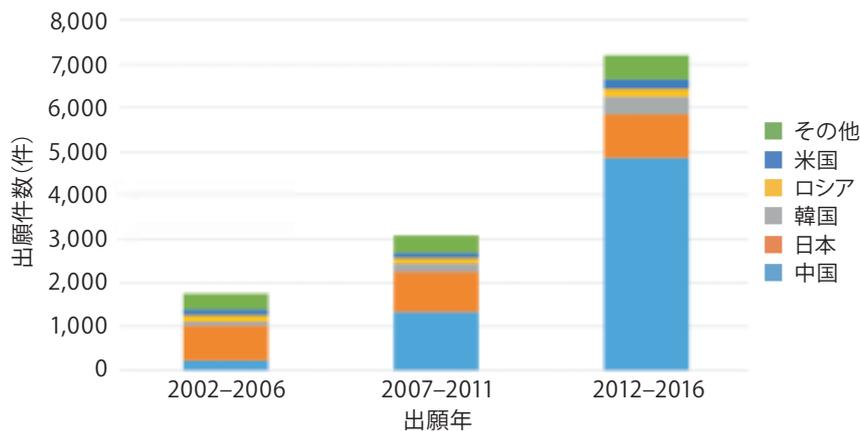


図14 アルミニウムリサイクルに関する出願件数の推移 (5年毎)

出所: Derwent Innovation™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

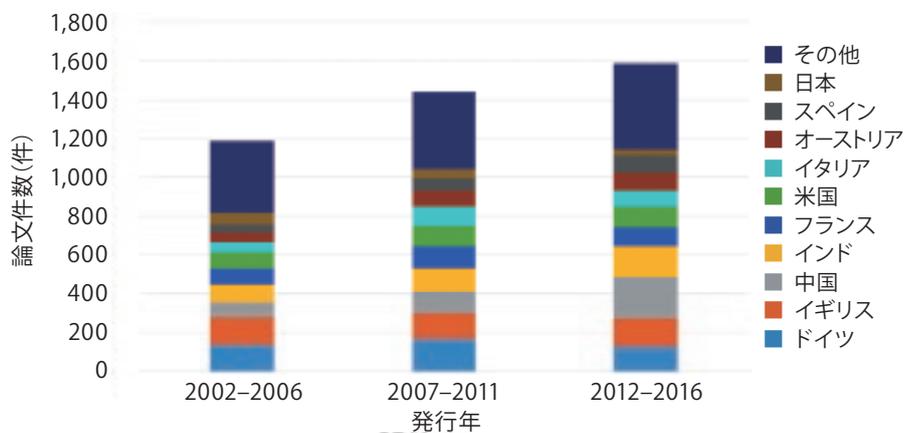


図15 アルミニウムリサイクルに関する論文掲載数の推移 (5年毎)

出所: Web of Science™での検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

### (2) 論文発表

2002年～2016年(期間15年)間に掲載されたアルミニウムリサイクルに関する論文について、国別、5年間ごとに掲載件数の推移の分析を行った。5年毎の件数の推移の分析(図15)からは、論文数はおおむね微増となっていることが明らかになった。

日本の件数は減少傾向にあり、直近5年間ではシェアを落としている。特許出願動向に比べ論文掲載数の伸びは小さく、実用化研究に移行していることが推定される。

### 3-5 標準化の動向

EU等では、アルミニウムの国際的な持続可能性基準を策定する動きがあり、ASI (Aluminum Stewardship Initiative) などは、アルミニウムのボーキサイト採掘から製品使用、リサイクルまでのバリューチェーンの全てを企業統治、環境、社会的責任等の観点から評価する基準であり、「アルミニウムの価値を最大限に高め、かつ環境・社会等への負の影響を最小限にすること」を目的に、2012年10月から標準化草案作成が進められている。参加主体は地金メーカー、板材メーカー、自動車・家電・食品などのユーザー企業、環境系NGO等であり、2019年2月現在79団体が加盟している。ASIから公表された基準は現時点で2点である。2014年12月に企業統治、環境、社会的責任等について11項目を定めた「ASI Performance Standard Version 1」(原則及び基準)が公表、続いて2015年1月に加工・流通における管理、情報流通の形式について12項目を定めた「Chain of Custody (CoC) Standard」(加工・流通過程の管理基準)が公表された。

これらISOやASI等の国際的標準化活動に関して、国内では日本アルミニウム協会が窓口団体となっており、規格制定・改正、それに向けた国内委員会の取りまとめ、国際会議への参加、JIS規格との適合性の検討、関連する調査研究等を行っている。アルミニウムに関する標準化はこれまで、材料の性能を元素成分組成から規定し、広く材料として利用できるよう標準化されてきたが、持続可能性等の新たな評価軸が重視されるようになってきたため、ライフサイクルでの低CO<sub>2</sub>排出評価や、サプライチェーン全体での管理等に関する標準化も進められている状況である。

# 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

## 3-6 技術体系と課題

アルミニウムの製造、利用、リサイクルに係る工程の概観と本書で扱うアルミニウムリサイクル技術を図16に示す。自動車や飲料缶、建材、家電等に材料として利用されたアルミニウムは、それぞれの廃棄処理ルートを経て収集され、スクラップとして静脈産業にてリサイクル処理が行われる。最初に中間処理業にて再生処理に適した原料となる

よう解体・破碎・選別等の前処理が行われ、次いでアルミニウム合金業にて再生処理として溶解・不純物除去等の成分調整を行い、二次地金として動脈産業に供給される。

動脈産業では、二次地金と新地金から材料・製品に求められる性能に応じた材料加工・製品加工を行い、市場に供給する。表9に各処理工程における要素技術とその内容についてまとめた。

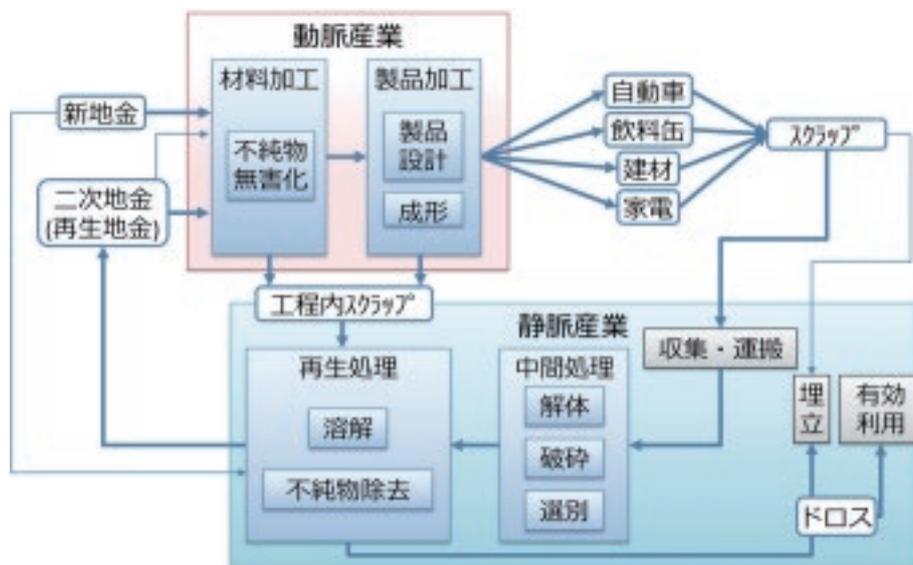


図16 アルミニウムリサイクルシステムと要素技術  
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

表9 アルミニウムリサイクル技術の体系

工程	要素技術	具体的な技術例
中間処理	解体	廃製品を部材に分離
	破碎	部材を素材単体に分離
	選別	素材ごとの分離・濃縮
再生処理	溶解	リサイクル材の溶解
	不純物低減	ガス成分、不純物元素の除去、低減
加工処理	材料加工	不純物の存在下でも物性を確保
	成形加工	低物性材料の使いこなし、水平リサイクル
	製品設計	中間処理効率化のための商品形態・構造設計

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

## 4章 おわりに

国際的な持続可能な開発の実現へ向けた流れの中で資源循環は重要であり、今後、産業活動の中で資源循環への取組をいっそう推進する必要がある。なかでもプラスチックやアルミニウムのリサイクルは、今後発展途上国の大幅な需要増に加え、資源の有効利用、CO<sub>2</sub>対策、海洋プラスチックごみ問題への対応から、リサイクルの促進は喫緊の課題であり、そのための関連技術の高度化が求められる。これまで日本では、世界をリードするリサイクル関連技術の開発・実装に加え、関連する制度や高い排出者の意識から、金属類を中心に比較的価値の高い資源においてはリサイクル先進国の位置にある。

プラスチックリサイクルでは、新しい固相重合技術により高度なペットボトルリサイクルが既に実用化されている。一方、汎用プラスチックに関するリサイクルの状況を見ると、サーマルリサイクルが主流となっており、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの割合は5～6%に留まっている。これまでの日本のプラスチック産業は高い品質を持つ多くの品種をそろえることを一つの強みとしており、リサイクル促進のために再生プラスチックの受入れ品質を落とすことは産業競争力強化の点から、好ましい選択とはいえない。このような現状を踏まえ、国内の約900万トン/年の廃プラスチックを総合的にリサイクル処理するための有効な技術開発を行うばかりでなく、技術の進展に併せた新しい標準化等を含むビジネスエコシステムの構築や市場獲得の方策についても検討する必要がある。

一方、アルミニウムは、特長となる軽量・高強度な材料として今後大きな需要の伸び(国内での使用量、蓄積量の増加)が予想されることから、国内において高効率、低コストなアルミニウムリサイクル技術の開発が期待されている。しかし、資源採掘から製造、利用、廃棄に至る全ての

段階のCO<sub>2</sub>排出(ライフサイクルCO<sub>2</sub>)が重要視される製品にとって、新地金製造時のCO<sub>2</sub>排出量の大きさがアルミニウム利用拡大の課題となっている。この抑制のため、新地金製造プロセスの低炭素化、リユースシステム、リサイクル利用に関する新しい技術開発が欧米を中心に行われている。国内では、新地金製造プロセスを担う産業が存在しないことから、循環によるライフサイクルCO<sub>2</sub>排出の抑制が、主なユーザである自動車産業、容器利用産業等によって行われることが期待される。

特に、再生したプラスチックやアルミニウムを継続して利用するためのQCD(Quality・Cost・Delivery)の確保が困難であり、バージン材料との競争力が小さく、循環システムが成立しないことが多い。そのため、技術開発のみならず、技術の進展に合わせた標準化と制度化等を検討し、周辺ビジネス支援や時流情勢なども含め、社会的に受容可能な循環システムの構築を早急に進めていく必要がある。

技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight vol.35

資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野の技術戦略策定に向けて

2019年11月1日発行

TSC Foresight Vol.35 資源循環(プラスチック、アルミニウム)分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター(TSC)

■ センター長 三島 良直

■ センター次長 西村 秀隆

## ■ 環境・化学ユニット

・ユニット長 土肥 英幸

・主任研究員 山下 勝

水野 紀子

・研究員 森 智和 (2019年5月まで)

加藤 知彦 (2019年5月まで)

定兼 修

林 直之

柳田 泰宏

・フェロー 府川 伊三郎 株式会社 旭リサーチセンター シニア・リサーチャー

・客員フェロー 指宿 堯嗣 一般社団法人 産業環境管理協会 技術顧問

島田 広道 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 理事

室井 高城 アイシーラボ 代表

## ■ マクロ分析ユニット

・客員フェロー 菊池 純一 青山学院大学 教授

● 本書に関する問い合わせ先  
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URL よりダウンロードできます。  
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。  
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。  
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。

## 研究開発事業に係る技術評価書（事前評価）

事業名	アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業	
担当部署	製造産業局金属課金属技術室、産業技術環境局資源循環経済課 国立研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構環境部	
事業期間	2021年度～2025年度（5年間）	
概算要求額	2021年度 1,282（百万円）	
会計区分	エネルギー対策特別会計	
実施形態	経産省（交付金） → NEDO（委託） → 事業者	
類型	研究開発プロジェクト	
事業目的	今後需要の急増が見込まれるアルミニウムについて、資源の高度循環利用を可能とすることにより、現在課題となっている製造時の温室効果ガス排出量の削減を行うとともに、低環境負荷アルミニウム素材を普及させることにより関係産業の競争力強化に寄与する。	
事業内容 (7ヶ化・7ヶイ)	本研究開発では、高度選別技術、不純物元素除去技術、微量不純物存在下での成形・加工技術を開発することにより、マテリアルフローのボトルネックとなっている再生材の展伸材への利用を可能とする。これにより、新地金に比べ環境負荷の低い再生地金の利用へ転換、CO <sub>2</sub> 排出量削減（1,914万トン/年；2050年）を狙う。最終的にはアルミ資源をほぼ循環利用する新たな資源循環システムを構築、高度資源循環社会を実現することを目標とする。	
	<b>研究開発目標(アウトプット目標)の指標</b>	<b>研究開発目標(アウトプット目標)</b>
2023年度 (中間目標)	<ul style="list-style-type: none"> <li>①高度選別技術： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鋳造材を含むスクラップから展伸材の高度選別技術</li> </ul> </li> <li>②不純物元素除去技術（溶解工程高度化）： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 溶融プロセスによる鋳造材を含むスクラップから再生合金の回収</li> </ul> </li> <li>③微量不純物存在下の材料特性向上技術： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 双ロール鋳造により、展伸材用途への利用を可能とする板材の開発</li> <li>・ 加工熱処理技術により、不純物を含む材料で特性を向上させる技術の確立</li> <li>・ シミュレーションにより成形性を評価する技術の開発</li> </ul> </li> <li>④トータルシステム評価： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GHG 排出量、コストの把握、標準化の取り組み</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 合金系選別において、選別精度 80%以上、かつ従来技術以下のコスト</li> <li>・ Si:5%のスクラップから Si:3%以下の再生アルミニウム 70%回収</li> <li>・ 従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系（6000 系）成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.8 倍</li> <li>・ 従来の新地金ベース 6000 系構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.2 倍</li> <li>・ 破断近傍いた板厚ひずみ予測誤差 1/2 以内</li> <li>・ 各プロセスの GHG 排出量把握、コスト評価実施、再生合金の規格化に向けて登録材料選定</li> </ul>
2025年度 (最終目標)	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 高度選別技術： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鋳造材を含むスクラップから展伸材の高度選別技術</li> </ul> </li> <li>② 不純物元素除去技術（溶解工程高度化）： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 溶融プロセスによる鋳造材を含むスクラップから再生合金の回収</li> </ul> </li> <li>③ 微量不純物存在下の材料特性向上技術： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 双ロール鋳造により、展伸材用途への利用を可能とする板材の開発</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 合金種別において、選別精度 95%以上、かつ現行技術 1/2 以下のコスト</li> <li>・ Si:7%のスクラップから Si:2%以下の再生アルミニウム 70%回収</li> <li>・ 従来の新地金ベース Al-Mg-Si 系（6000 系）成形用板材と引張強度同等で、伸び 0.9 倍</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>加工熱処理技術により、不純物を含む材料で特性を向上させる技術の確立</li> <li>シミュレーションにより成形性を評価する技術の開発</li> </ul> <p>④ トータルシステム評価：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>GHG 排出量、コストの算出、標準化の取り組み</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来の新地金ベース 6000 系構造用材料と伸び同等で、引張強度 1.5 倍</li> <li>破断近傍いた板厚ひずみ予測誤差 1/5</li> <li>各プロセスを組み合わせた GHG 排出量算出、コスト評価実施、再生合金の規格化に向けて登録申請</li> </ul>
--	--	--

**研究開発成果（アウトプット）の受け手**

リサイクラー，アルミニウム圧延メーカー，アルミニウム二次合金メーカー，アルミニウム素材ユーザー企業等

アウトカム指標		アウトカム目標
2040 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生展伸材生産量</li> <li>製造時における温室効果ガス排出量</li> <li>再生展伸材生産量に関しては、二次材使用率または展伸材用地金国産率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>130 万トン</li> <li>968 万トン</li> <li>30%</li> </ul>
2050 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生展伸材生産量</li> <li>製造時における温室効果ガス排出量</li> <li>再生展伸材生産量に関しては、二次材使用率または展伸材用地金国産率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>257 万トン</li> <li>1914 万トン</li> <li>50%</li> </ul>

**外部有識者の所見【技術評価】**

CO<sub>2</sub> の削減、資源循環の観点から、アウトカムの価値の高い事業である。選別から加工・成型までの必要な要素技術が十分に検討されて開発項目となっている点、トータルシステム評価を独立した項目として重視している点や事業化を視野にいれたプロジェクトとなっていることは評価できる。一方、新規のアルミニウム素材の普及には、合金規格が重要な役割を担っており、サプライチェーンの供給・需要側の各ステークホルダーが連携し、戦略を立てて実施することを期待する。また、国際標準化の推進が重要となるので、国外での事業展開についても国際先進性が確保できる様に充分検討して欲しい。[第 62 回 NEDO 研究評価委員会]

**上記所見を踏まえた対処方針**

当該事業の実施にあっては、建材メーカーや自動車メーカーなどのアルミニウムユーザー企業のニーズを踏まえた技術開発を進め、ターゲットを見極めて合金規格の認定を目指す。具体的には、外部有識者による技術推進委員会等を設置し、幅広い分野のユーザー企業の参画をもって、ユーザー企業が求めるスペック・ニーズを研究開発に反映するなどして技術開発を進める。さらに、国際動向や世界的な規制などについても調査を行いながら、国際標準化を行う登録材料の選定を行うことで、早期社会実装を実現できるよう戦略的に進めていく予定。



作成：2021年3月

## プロジェクト名：アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業

### 研究開発の目的

- ・環境問題の深刻化が予測され、循環経済（CE）への転換が求められているが、アルミは資源循環向上の取組が期待される素材である。
- ・アルミは輸送用機器の軽量化等、CO<sub>2</sub>排出量削減目的の用途で需要の大きな伸びが予測されているが、新地金は製造時のCO<sub>2</sub>排出原単位が11.1kg-CO<sub>2</sub>eq/kgと大きい。
- ・一方、再生地金は再生のためのエネルギーが新地金製造の1/20程度と少なく、需要が増大しつつある。
- ・ただし、アルミスクラップのリサイクル過程で混入する不純物により、再生地金の用途は一部に限定される状況にある。
- ・本事業はアルミの高度資源循環システム構築のため、不純物元素低減技術、微量不純物を無害化する高度加工技術等を開発する。

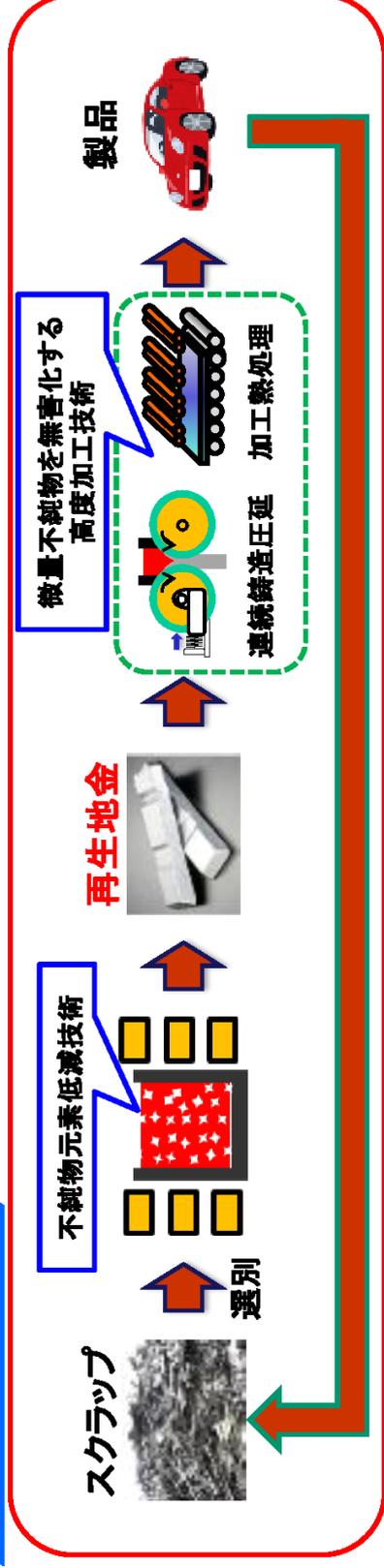
### プロジェクトの規模

- ・事業費総額 30億円（予定）
- ・NEDO予算総額 15億円（予定）【助成】
- ・実施期間 2021～2025年度（5年間）

### 研究開発の内容

- (1) 不純物元素低減技術の開発  
アルミニウムスクラップは、混入する不純物により展伸材に求められる高い材料性能が得られないため、不純物元素を低減する技術を開発する。  
 <ポイント>
  - ・固液平衡に基づく高純度初晶粒子の析出
  - ・純度の高い固体の分離回収
- (2) 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発  
不純物元素がある程度低減された再生アルミニウムから展伸材へ利用を可能とするような、材料特性を向上（高延性化、高強度化）させる技術を開発する。  
 <ポイント>
  - ・不純物元素の合金中への固溶
  - ・結晶組織の制御

### 成果適用のイメージ



詳細は「基本計画」をご参照ください

「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業 基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

2021年4月23日  
NEDO  
環境部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

1. パブリックコメント募集期間  
2021年1月15日～2021年1月29日
2. パブリックコメント投稿数<有効のもの>  
計0件

以上

## ●特許論文等リスト

研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

「溶融塩使用固体電解によるアルミ合金スクラップからの高純度アルミ精製技術の開発」

### 【論文】リスト

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Xin Lu、張政陽、平木岳人、竹田修、朱鴻民、松八重一代、長坂徹也	東北大学	A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap	Nature, 606(2022) 511-515	有り	2022/4/13

### 【外部発表】リスト

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	朱 鴻民	東北大学	溶融塩電解を用いたアルミニウムのリサイクルプロセス	自動車技術会 2023年春季大会	2023/5/26

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東北大学	アルミニウムのサステナブルリサイクル新技術開発	東北大学ウェブサイト 東北大学工学部ウェブサイト	2022/4/26

研究開発項目① 不純物元素低減技術の開発

「資源循環社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

【特許】

出願件数：1 件

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ	査読	発表年月
1	志賀敬次、 村上雄一朗、 尾村直紀	産業技術 総合研究 所	Effect of Electromagnetic Stirring on the Shape of $\beta$ -Al <sub>9</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> Intermetallic Compound During the Solidification of Al-Si- Fe Alloys	MATERIALS TRANSACTIONS 64(2023)3 p. 650-656	有り	2022/9/30

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	志賀敬次、 村上雄一朗、 尾村直紀	産業技術 総合研究 所	Al-Si-Fe 系合金中の金属 間化合物の形状に及ぼす電 磁攪拌の影響	日本鑄造工学会 第 180 回全国講演大会	2022/9/30
2	村上雄一朗	産業技術 総合研究 所	低環境負荷社会構築に向け たアルミニウムの資源循環技 術開発	日本化学会秋季事業 第 12 回 CSJ 化学フェ スタ 2022	2022/10/18
3	村上雄一朗	産業技術 総合研究 所	アルミニウムの高度資源循環 社会構築にむけて ~不純物 元素の除去技術~	第 22 回 国際ナノテクノ ロジー総合展・技術会議 (nano tech 2023)	2022/12/1、 2023/2/1~3

(b) 展示会への出展

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	村上雄一朗	産業技術総 合研究所	アルミニウムの高度資源 循環社会構築にむけて ~不純物元素の除去技 術~	第 22 回 国際ナノテクノ ロジー総合展・技術会議 (nano tech 2023)	2023/2/1~3

研究開発項目② 微量不純物を無害化する高度加工技術等の開発

「資源循環社会構築に向けたアルミニウム資源のアップグレードリサイクル技術開発」

【特許】

出願件数：1件

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ	査読	発表年月
1	梶村真吾、 黒龍星七、 Thai Ha Nguyen、 原田陽平、 村石信二、 熊井真次	東京電機大、 東京工業大	Effect of nozzle shape on periodic surface patterns of Al-3mass%Si alloy strips fabricated by vertical-type high-speed twin-roll casting	Materials Transactions, Special Issue on Aluminium and Its Alloys for Zero Carbon Society, ICAA18, In press.	有り	2023/2

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	河尻耕太郎	エイゾス	「AIによる革新的実験計画法と将来技術のLCA評価の組合せによる多目的エコデザイン最適化：アルミニウムのアップグレードリサイクルプロセスの事例」	第17回日本LCA学会研究発表会	2022/3/4
2	梶村真吾、 黒龍星七、 Thai Ha Nguyen、 原田陽平、 村石信二、 熊井真次	東京電機大、 東京工業大	Effect of nozzle shape on periodic surface patterns of Al-3mass%Si alloy strips fabricated by vertical-type high-speed twin-roll casting	The 18th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA18)	2022/9/6
3	黒龍星七、 梶村真吾、 原田陽平、 村石信二、 熊井真次	東京電機大、 東京工業大	縦型高速双ロール鋳造法で作製したAl-3%Si合金板の表面品質に及ぼすノズル先端形状の影響	軽金属学会 第143回秋期大会	2022/11/12
4	波多野滉也、 瀧澤英男	日本工業大	「板厚半減加工を用いた平面ひずみ引張試験法の検討」	第73回塑性加工連合講演会（仙台）、日本塑性加工学	2022/11/19

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
5	河尻耕太郎	エイゾス	次世代に求められる鑄造材料および接合技術	公益社団法人 日本鑄造工学会 東海支部 第 145 回非鉄鑄物研究部会	2023/3/6
6	角省吾、 羽賀俊雄	大阪工業大	溝を有するロールを使用した 双ロール鑄造の特性	日本機械学会関西学生会 2022 年度学生 員卒業研究発表会	2023/3/15
7	大谷芳次、 羽賀俊雄	大阪工業大	双ロールキャストで鑄造した 板表面に対するロール面の 影響	日本機械学会関西学生会 2022 年度学生 員卒業研究発表会	2023/3/15
8	池田航、 桑原利彦、 市川武志、 櫻井健夫	東京農工大、 神戸製鋼所	M-K 法による 5000 系アル ミニウム合金板の成形性予 測	軽金属学会第 144 回 春期大会	2023/5/13
9	関谷航輝、 桑原利彦、 市川武志、 櫻井健夫	東京農工大、 神戸製鋼所	5000 系アルミニウム合金板 の穴広げ成形シミュレーション と成形限界予測法	軽金属学会第 144 回 春期大会	2023/5/13
10	原聡宏、 一谷幸司、 戸次洋一郎	UACJ	高圧スライド加工を施したり サイクル想定組成アルミニウ ム合金の機械的特性	軽金属学会第 144 回 春期大会	2023/5/13
11	黒龍星七、梶村 慎吾、原田陽平、 村石信二、熊井 真次	東京電機大、 東京工業大	Al-Si 合金双ロール鑄造板 の表面模様及ぼすノズル 先端厚さと合金組成の影響	軽金属学会第 144 回 春期大会	2023/5/14
12	河尻耕太郎	エイゾス	人工知能を活用した革新的 実験計画法と Ex-ante LCA によるアルミニウムアップ グレードリサイクルプロセスの 最適化	軽金属学会第 128 回 シンポジウム 「アルミニウムのアップグ レードリサイクル技術」	2023/5/31

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	エイゾス	アルミニウムのサステナブルリサイクル新技術開発	株式会社エイゾス ウェブサイト	2022/4/1